



Opetusrakennuksen peruskorjauksen hiilijalanjäljen tarkastelu

Teppo Siponkoski

Opinnäytetyö, ylempi AMK

toukokuu 2023

Rakennustekniikan tutkinto-ohjelma YAMK

Siponkoski, Teppo

Opetusrakennuksen peruskorjauksen hiilijalanjäljen tarkastelu

Jyväskylä: Jyväskylän ammattikorkeakoulu. Toukokuu 2023, 110 sivua

Rakennustekniikan tutkinto-ohjelma. Opinnäytetyö YAMK.

Julkaisun kieli: suomi

Julkaisulupa avoimessa verkossa: kyllä

Tiivistelmä

Ilmastonmuutoksen hillitsemiseksi EU on asettanut jäsenvaltioilleen sitovia vuosittaisia päästövähennystavoitteita vuosille 2021–2030. Suomelle asetettu päästövähennystavoite on vähentää päästöjä 39 % vuoden 2005 tasosta vuoteen 2030 mennessä. Tämän lisäksi Suomi tavoittelee hiilineutraaliutta vuoteen 2035 mennessä. Päästövähennystavoitteiden saavuttamiseksi on tarpeen vähentää erityisesti rakennusten kasvihuonekaasupäästöjä, sillä eri arvioiden mukaan rakennukset aiheuttavat yli 30 % Suomen kasvihuonekaasupäästöistä. Rakennusten vaikutus kasvihuonekaasupäästöihin on huomioitu myös maankäyttö- ja rakennuslain uudistuksessa; uuden rakentamislain myötä hiilijalanjäljen laskennasta tulee olennainen osa rakennusten lupaprosessia.

Työn tavoitteena oli tutkimuksellisin menetelmin, kohderakennuksen hiilijalanjäljen laskennan avulla, tuottaa lisätietoa peruskorjattavan 1970-luvun opetusrakennuksen hiilijalanjäljen muodostumisesta. Työssä tutkittiin eri rakennusosien peruskorjauksen vaikutuksia rakennuksen elinkaaren hiilijalanjälkeen ja selvitettiin, minkä rakennusosien korjaaminen nostaa merkittävimmin rakennuksen hiilijalanjälkeä. Lisäksi peruskorjatun rakennuksen elinkaaren hiilijalanjälkeä verrattiin vastaavien uudisrakennusten hiilijalanjälkeen.

Työ toteutettiin tapaustutkimuksena, joka sisälsi sekä kvantitatiivisia että kvalitatiivisia puolia. Työssä laskettiin 1970-luvun opetusrakennuksen peruskorjauksen hiilijalanjälki 50 vuoden elinkaaren aikana Ympäristöministeriön julkaisemaa Rakennuksen vähähiilisyyden arviointimenetelmää noudattaen. Laskentatulosten perusteella voitiin vertailla rakennuksen elinkaaren hiilijalanjälkeä vastaavan uudisrakennuksen hiilijalanjälkeen ja tarkastella peruskorjattavien rakennusosien keskinäistä vertautumista päästöjen osalta.

Peruskorjatun 1970-luvun opetusrakennuksen elinkaaren hiilijalanjäljeksi saatiin 15,72 kgCO₂/m²/a. Suurin osa rakennuksen elinkaaren hiilijalanjäljestä aiheutui tuotevaiheesta ja käytön aikaisesta energiankulutuksesta. Verrattaessa hiilijalanjälkeä vastaavien uudisrakennusten hiilijalanjälkeen huomattiin, että peruskorjatun rakennuksen hiilijalanjälki voi olla uudisrakennusta pienempi mutta hiilijalanjäljen vertautuminen on aina tapauskohtaista. Rakennusosista suurimmat päästöt aiheutuivat ylä- ja alapohjien korjauksesta niin tuotevaiheessa kuin myös käytön energiankulutus huomioiden. Tuotevaiheessa ulkoseinien ja välipohjien korjaus tuotti kolmanneksi ja neljänneksi eniten päästöjä, mutta käytön energiankulutus huomioiden ikkunat nousivat näiden ohi kolmanneksi, johtuen ikkunoiden verrattain huonosta U-arvosta.

Avainsanat (asiasanat)

Elinkaari, hiilijalanjälki, hiilineutraalius, kasvihuonekaasut, käyttöikä, peruskorjaus, vähähiilisyyys

Muut tiedot (salassa pidettävät liitteet)

-

Siponkoski, Teppo

Analysis of the carbon footprint of the educational building's renovation

Jyväskylä: JAMK University of Applied Sciences, May 2023, 110 pages

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

Permission for open access publication: Yes

Language of publication: Finnish

Abstract

The EU has set binding annual emission reduction targets for the years 2021–2030. The emission reduction goal set for Finland is to reduce emissions by 39 % from the 2005 level by 2030. Finland is also aiming for carbon neutrality by 2035. To achieve the emission reduction goals, it is necessary to reduce greenhouse gas emissions from buildings. The impact of buildings on greenhouse gas emissions has also been considered in the reform of the Finnish construction legislation; with the new construction law, calculating the carbon footprint becomes an essential part of the building permit process.

The goal of the work was by using research methods to generate additional information about the formation of the carbon footprint of the 1970s educational building renovation. In the work, the effects of the renovation of different building parts on the carbon footprint of the building's life cycle were investigated and it was found out which building parts' renovation increases the building's carbon footprint most significantly. In addition, the life cycle carbon footprint of the renovated building was compared with the carbon footprint of similar new buildings.

The work was carried out as a case study, which included both quantitative and qualitative aspects. In the work, the carbon footprint of the 1970s educational building renovation was calculated during the 50-year life cycle, following the Building's Low Carbon Assessment Methodology. Based on the calculation results, it was possible to compare the carbon footprint of the building's life cycle with the carbon footprint of the corresponding new building and to examine the mutual comparison of the building parts to be renovated in terms of emissions.

The life cycle carbon footprint of the renovated 1970s educational building was 15.72 kgCO₂/m²/a. Most of the carbon footprint of the building's life cycle was caused by the product phase and energy consumption. It was also noticed that the carbon footprint of a renovated building can be smaller than a new building, but the carbon footprint comparison is always case-specific. Among building parts, the largest emissions were caused by the renovation of the roof and ground floor both in the product phase and including the energy consumption. In the product phase, the repair of external walls and intermediate floors produced the third and fourth highest emissions, but including the energy consumption, the windows rose past them to third place, due to the relatively poor U-value of the windows.

Keywords/tags (subjects)

Life cycle, carbon footprint, carbon neutrality, greenhouse gases, lifespan, renovation, low carbon

Miscellaneous (Confidential information)

-

Sisältö

1	Johdanto.....	4
2	Tutkimusasetelma	6
2.1	Kehittämistyön tavoitteet, rajaukset ja tutkimuskysymykset	6
2.2	Tiedonhaku ja lähdeaineisto	7
2.3	Kehittämistyön tutkimusmenetelmät	7
2.4	Aineiston kuvaus ja analyysi.....	8
3	Rakentaminen ja ilmastomuutos.....	9
3.1	Kasvihuonekaasujen ilmastovaikutus.....	9
3.2	Hiilijalanjälki ilmastokuormituksen mittana	12
3.3	Rakennusten vaikutus ilmastomuutokseen.....	13
3.4	Rakennuksen elinkaaren kasvihuonekaasupäästöt.....	14
3.4.1	Elinkaariarviomenetelmä rakennusten ympäristövaikutusten arvioinnissa	14
3.4.2	Elinkaaren vaiheiden hiilijalanjälki	17
3.5	Rakennusmateriaalien hiilijalanjälki.....	22
3.5.1	Betonirakenteiden hiilijalanjälki.....	24
3.5.2	Teräksen hiilijalanjälki.....	26
3.6	Polttoaineet ja käyttövaiheen hiilijalanjälki.....	27
4	Rakentamisen päästövähennyskeinoja	30
4.1	Rakennusmateriaalien päästöjen pienentäminen	30
4.1.1	Betonin päästövähennyskeinoja	30
4.1.2	Teräsrakenteiden päästövähennyskeinoja	34
4.2	Suunnittelun valintojen vaikutus rakennuksen hiilijalanjälkeen	35
4.2.1	Rakennuspaikan vaikutus rakennuksen hiilijalanjälkeen	36
4.2.2	Vähähiilisyysnäkökulma rakennuksen energiankulutuksen pienentämisessä	37
5	Rakennuksen vähähiilisyyden arviointimenetelmä	42
6	Hiilijalanjälkilaskennan toteutus	48
6.1	Laskentakohteen kuvaus.....	48
6.1.1	Rakennuksen geometria	48
6.1.2	Alkuperäiset rakennetyypit.....	51
6.2	Laskentakohteen peruskorjaus	57
6.2.1	Peruskorjauksen korjaustapavaihtoehto.....	57
6.2.2	Korjatut rakennetyypit.....	59
6.3	Hiilijalanjäljen laskeminen	63
6.3.1	Tuotevaiheen hiilijalanjälki A1–A3	64

6.3.2	Rakentamisvaiheen hiilijalanjälki A4–A5	67
6.3.3	Käytönaikaisten korjausten ja osien vaihdon hiilijalanjälki B3–B4	68
6.3.4	Energian käytön hiilijalanjälki B6.....	70
6.3.5	Elinkaaren loppu C1–C4	76
7	Tulokset ja johtopäätökset	77
7.1	Peruskorjatun 1970-luvun opetusrakennuksen elinkaaren hiilijalanjälki	77
7.2	Peruskorjattujen rakennusosien hiilijalanjälki	85
8	Pohdinta	91
	Lähteet	96
	Liitteet	103
	Liite 1. Hiilijalanjäljen laskentataulukot	103
 Kuviot		
	Kuvio 1. Maapallon keskimääräisen pintalämpötilan kehittyminen ja ihmisen sekä luonnollisten tekijöiden vaikutus pintalämpötilaan aikavälillä 1850–2019	10
	Kuvio 2. ISO 14040:2006 -standardin mukaiset elinkaariarvioinnin vaiheet	15
	Kuvio 3. EN 15978 -standardin mukaiset rakennuksen elinkaaren vaiheet	17
	Kuvio 4. Rakennusten tuotesidonnaisten ja käyttösidonnaisten kasvihuonekaasupäästöjen jakautumisen trendi maailmanlaajuisesti tarkasteltuna.	19
	Kuvio 5. Tuotesidonnaisten ja käyttösidonnaisten kasvihuonekaasupäästöjen suhteellinen osuus rakennuksen elinkaaren kokonaispäästöistä energiatehokkuudeltaan eri tasoissa rakennuksissa	20
	Kuvio 6. Rakennuksen elinkaaren hiilijalanjäljen jakautuminen elinkaaren eri vaiheisiin.	21
	Kuvio 7. Rakennuksen elinkaaren hiilijalanjäljen jakautuminen elinkaaren eri vaiheisiin.	21
	Kuvio 8. Rakennuksen hiilijalanjäljen kasvu elinkaaren aikana, periaatekuva.....	23
	Kuvio 9. Rakennetun ympäristön elinkaaren päästöjen suhteellinen osuus Suomen vuoden 2018 kokonaispäästöistä.....	28
	Kuvio 10. Polttoaineiden kokonaispäästöjen jakautuminen tuotannon ja polton päästöihin ..	29
	Kuvio 11. Vähähiilisyyden arviointimenetelmän rajaukset.....	44
	Kuvio 12. Rakennuksen elinkaaren vaiheet.....	45
	Kuvio 13. Laskentakohteen 1. kerroksen pohjakuva.	50
	Kuvio 14. Laskentakohteen 2. kerroksen pohjakuva.	50
	Kuvio 15. Laskentakohteen leikkauskuva.....	51
	Kuvio 16. Laskentakohteen yläpohjan alkuperäinen rakennetyyppi.....	52
	Kuvio 17. Laskentakohteen ulkoseinän alkuperäinen rakennetyyppi.	54
	Kuvio 18. Laskentakohteen alapohjan alkuperäinen rakennetyyppi.	55

Kuvio 19. Laskentakohteen välipohjan alkuperäinen rakennetyyppi.....	56
Kuvio 20. Laskentakohteen väliseinien alkuperäiset rakennetyypit.	56
Kuvio 21. Yläpohjan korjattu rakennetyyppi.....	60
Kuvio 22. Ulkoseinän korjattu rakennetyyppi.	61
Kuvio 23. Alapohjan korjattu rakennetyyppi.....	62
Kuvio 24. Välipohjan korjattu rakennetyyppi.....	63
Kuvio 25. XPS-eristeen päästötietojen näkymä Rakentamisen päästötietokannassa.....	65
Kuvio 26. Rakennetietojen täydentäminen energialaskentaohjelmaan	72

Taulukot

Taulukko 1. Voimassa olevat energiamuotokertoimet.....	39
Taulukko 2. Hiilijalanjäljen laskennassa käytettävät taulukkoarvot	47
Taulukko 3. Energiamuotojen ja polttoaineiden päästökertoimet	48
Taulukko 4. Rakennuksen ominaisuustietotaulukko hiilijalanjäljen laskentaa varten.	64
Taulukko 5. Yläpohjan tuotevaiheen A1–A3 hiilijalanjäljen laskentataulukko.	67
Taulukko 6. Yläpohjan korjausten ja osien vaihdon B3–B4 hiilijalanjäljen laskentataulukko....	69
Taulukko 7. Säävyöhykkeen I kuukausittaiset ulkoilman keskilämpötilat T_u ja tuntimäärät.....	74
Taulukko 8. Alapohjan alapuolisen maan kuukausittaisen ja vuotuisen keskilämpötilan ero...	75
Taulukko 9. Kaukolämmön ja sähkön energiaskenaariot	76
Taulukko 10. Opetusrakennusten hiilijalanjälkitietojen vertailu.	83
Taulukko 11. Rakennusosien johtumislämpöhäviöt, U-arvot ja pinta-alat.....	88

1 Johdanto

Ilmastonmuutos aiheuttaa laaja-alaisia ongelmia niin ihmisille, eläimille kuin myös luonnolle. Ilmastonmuutoksen hillitsemiseksi on tarpeen tehdä globaaleja päästövähennystoimenpiteitä, vähentää luonnonvarojen käyttöä sekä edistää kiertotaloutta. Ilmastonmuutos on nykytiedon mukaan väistämätöntä, mutta päästövähennyksillä voidaan vielä rajoittaa sen seurauksia. Euroopan unioni on sitoutunut vähentämään kasvihuonekaasupäästöjä vähintään 55 % vuoden 1990 tasosta vuoteen 2030 mennessä. EU on lisäksi asettanut tavoitteekseen saavuttaa ilmastoneutraalius vuoteen 2050 mennessä. Näiden toteuttamiseksi EU:n jäsenvaltioille on asetettu sitovia vuosittaisia päästövähennystavoitteita vuosille 2021–2030. Valtiokohtaisia päästövähennystavoitteita on asetettu EU-tason päästökauppaan sekä kansallisen tason taakanjakosektoriin, johon sisältyy mm. rakentamisen, rakennusten lämmityksen ja asumisen kasvihuonekaasupäästöt. Suomelle asetettu taakanjakosektorin päästövähennystavoite on vähentää päästöjä 39 % vuoden 2005 tasosta vuoteen 2030 mennessä. Suomen hallitus päätti lisäksi vuonna 2019, että Suomi tavoittelee hiilineutraaliutta vuoteen 2035 mennessä. (EU:n ratkaisut ilmastonmuutoksen ehkäisemiseksi 2022; Hallituksen ilmastopolitiikka: kohti hiilineutraalia Suomea 2035 n.d.)

Päästövähennystavoitteiden saavuttamiseksi on tarpeen vähentää rakennusten kasvihuonekaasupäästöjä, sillä eri arvioiden mukaan rakennukset aiheuttavat yli 30 % Suomen kasvihuonekaasupäästöistä (Rakennettu ympäristö ja ilmastonmuutos n.d). Jatkossa rakennusten elinkaaren hiilijalanjälkeen tullaankin kiinnittämään yhä enemmän huomiota, esimerkiksi uuden 1.1.2025 voimaan tulevan rakentamislain yhtenä uutena osana on rakentamisen hiilijalanjälkeä ohjaava lainsäädäntö. Vuoden 2022 loppupuolella Ympäristöministeriö julkaisi asetusluonnoksen rakennuksen ilmastaselvityksestä, joka tulisi velvoittamaan uuden rakennuksen ja laajasti korjattavan olevan rakennuksen vähähiilisyyden arviointiin. Arviointia varten Ympäristöministeriö on julkaissut vuonna 2019 vähähiilisyyden arviointimenetelmän ”Rakennuksen vähähiilisyyden arviointimenetelmä”. Arviointimenetelmää on päivitetty vuonna 2021 ja tullaan päivittämään vielä kertaalleen ennen rakennuksen vähähiilisyyden arviointia koskevan asetuksen voimaantuloa.

Koska rakennusten vaikutus kasvihuonekaasupäästöihin on merkittävä niin Suomessa kuin myös maailmanlaajuisesti, on kiinteistöjen omistajatahoilla mahdollisuus, ja tulevan lainsäädännön myötä myös velvollisuus, osallistua päästövähennystavoitteiden saavuttamiseen. Merkittävä osa Suomen rakennuskannasta on peruskorjausikäistä tai käyttöikänsä loppua lähestyvää vuosina

1970–1990 valmistunutta rakennuskantaa, jonka osalta on ajankohtaista puntaroida rakennuksen peruskorjauksen kannattavuutta (Rakennuskannan ikäjakauma 2022). Purkava uudisrakentaminen ei välttämättä ole peruskorjausta kannattavampi vaihtoehto, vaan eri vaihtoehtojen kannattavuutta tulee tarkastella mm. tilojen käytettävyyden, teknis-taloudellisen näkökulman ja ilmastonmuutoksen myötä myös rakennuksen vähähiilisyyden näkökulmasta.

Opinnäytetyön toimeksiantaja FCG Finnish Consulting Group Oy on yli 70 vuotta toiminut suomalainen suunnittelu- ja konsultointipalveluja tarjoava yritys, joka on mukana tukemassa kiinteistön omistajien päätöksentekoa tarjoamalla konsultointipalveluina mm. rakennusten tutkimuksia, suunnittelua ja elinkaari-, kustannus- sekä hiilijalanjälkilaskentaa. Hiilijalanjäljen laskentapalveluiden kysyntään on odotettavissa kasvua globaalien päästövähennystavoitteiden ja toisaalta myös rakentamislain uudistuksen myötä. Kasvavan kysynnän myötä on tärkeää kehittää yrityksen hiilijalanjäljen laskentapalveluiden asiantuntijuutta, jotta yrityksellä on hyvät edellytykset palvella asiakkaita laadukkaasti myös tulevaisuudessa.

Opinnäytetyön tavoitteena oli kehittää toimeksiantajan hiilijalanjäljen laskentapalveluita tuottamalla lisätietoa rakennuksen peruskorjauksen hiilijalanjäljen muodostumisesta. Rakennusten peruskorjausta ja purkavaa uudisrakentamista vertailevia tutkimuksia on julkaistu viime vuosina enenevässä määrin, ja toimeksiantajan kokemuksen mukaan peruskorjausta ja uudisrakentamista vertailevan tutkimuksen sijaan lisätietoa tarvitaan erityisesti rakennusosien peruskorjauksen vaikutuksista rakennuksen elinkaaren hiilijalanjälkeen. Edellä mainittuihin kehitys- ja tutkimustarpeisiin pohjautuen opinnäytetyön tehtävänä oli tuottaa tutkimuksellisin menetelmin lisätietoa rakennusosien vaikutuksista peruskorjattavan 1970-luvulla rakennetun opetusrakennuksen elinkaaren hiilijalanjälkeen. Opinnäytetyön hiilijalanjälkilaskennassa tarkasteltu peruskorjausvaihtoehto pohjautui Ympäristöministeriön korjausoppaaseen ”Kosteus- ja mikrobivaurioituneiden rakennusten korjaus” ja laskentamenetelmänä käytettiin ministeriön julkaisemaa vuoden 2019 rakennuksen vähähiilisyyden arviointimenetelmää. Peruskorjausvaihtoehdon hiilijalanjälkilaskelmien perusteella selvitettiin, minkä rakennusosien korjaus kasvattaa merkittävimmin peruskorjauksen hiilijalanjälkeä. Lisäksi vertailtiin peruskorjatun rakennuksen elinkaaren hiilijalanjälkeä vastaavan uuden opetusrakennuksen hiilijalanjälkeen.

2 Tutkimusasetelma

2.1 Kehittämistyön tavoitteet, rajaukset ja tutkimuskysymykset

Opinnäytetyön tavoitteena on tutkimuksellisin menetelmin, kohderakennuksen hiilijalanjäljen laskennan avulla, tuottaa lisätietoa peruskorjauksen hiilijalanjäljen muodostumisesta. Lisäksi tavoitteena on tarkastella peruskorjatun rakennuksen hiilijalanjäljen vertautumista vastaavan uudisrakennuksen hiilijalanjälkeen. Laskentakohteeksi tutkimukseen valitaan opetusrakennus.

Opinnäytetyössä tarkasteltavat rakennusosien korjausmenetelmät rajataan yhteen korjaustapavaihtoehtoon. Tarkasteltava korjaustapavaihtoehto pohjautuu Kosteus- ja mikrobivaurioituneiden rakennusten korjaus -oppaan mukaiseen rakennusosien laajempaan korjausvaihtoehtoon (oppaan korjausvaihtoehto A), jossa rakenteet joko uusitaan kokonaisuudessaan tai puretaan ja korjataan kantavaan rakenteeseen saakka. Uudisrakennuksen osalta hiilijalanjäljen vertailutiedoksi valitaan Huuhkan ja muiden (2021) tutkimuksessa laskettu uuden betonirakenteisen koulun hiilijalanjälkitieto ja Bionova Oy:n (2021) tutkimuksessaan määrittämä uuden referenssikoulurakennuksen hiilijalanjälkitieto.

Opinnäytetyön tutkimuskysymyksinä ovat:

1. Minkä rakennusosien korjaaminen nostaa merkittävimmin kohderakennuksen peruskorjauksen hiilijalanjälkeä?
2. Onko tarkastellun kohteen peruskorjaaminen ympäristön kannalta uudisrakentamista parempi vaihtoehto; muodostuuko peruskorjatun rakennuksen hiilijalanjälki valitun tarkastelujakson aikana pienemmäksi kuin vastaavan uudisrakennuksen hiilijalanjälki?

Rakennuksen elinkaaren hiilijalanjäljen tarkastelujakson pituudeksi valitaan Ympäristöministeriön Rakennuksen vähähiilisyyden arviointimenetelmän mukaisesti 50 vuotta. Opinnäytetyössä tuotetun tiedon perusteella kehitetään toimeksiantajan hiilijalanjäljen laskentapalveluiden ja korjaussuunnittelupalveluiden asiantuntemusta; tuotettuun tietoon pohjautuen laskentakohdetta vastaavien peruskorjaushankkeiden hiilijalanjäljen suuruutta ja vertautumista vastaavaan uudisrakennukseen voidaan arvioida karkeasti jo hankkeiden alkuvaiheessa. Lisäksi saadaan lisätie-

toa eri tekijöiden vaikutuksesta peruskorjattavan rakennuksen elinkaaren hiilijalanjälkeen. Opinnäytetyötä voidaan käyttää myös toimeksiantajan palveluiden markkinoinnissa case-esimerkkinä hiilijalanjälkitarkastelusta.

2.2 Tiedonhaku ja lähdeaineisto

Opinnäytetyön tietoperusta koostuu kolmesta kokonaisuudesta, joilla taustoitetaan opinnäytetyön aihetta ja tuetaan työn tulosten johtopäätöksiä ja pohdintaosuutta. Tietoperustan teorianeemoiksi valittiin: rakentaminen ja ilmastonmuutos, rakentamisen päästövähennyskeinot ja työssä käytettävän rakennuksen vähähiilisyyden arviointimenetelmän esittely. Tietoperustan lähdeaineistona on pyritty käyttämään alkuperäisaineistoja ja vertaisarvioituja tutkimusartikkeleita. Käsitteiden osalla lähdeaineistona on käytetty osin toissijaisia lähteitä, näissäkin tapauksissa käsitteen määrittely on kuitenkin varmistettu vähintään kahdesta eri lähteestä. Tuotevalmistajien julkaisuja ja ammattialan lehtiä on käytetty lähteinä harkiten ja tiedostaen kirjoittajien ja kirjoitusten mahdollinen si-dosteisuus. Lähteiksi on valittu niin kotimaisia kuin myös kansainvälisiä lähteitä.

Tietoperustan ensimmäisessä osiossa, luvussa 3, kerrotaan ilmastonmuutoksesta yleisesti, sen syistä ja seuraamuksista sekä kuvataan, mitä on hiilijalanjälki. Luvussa kerrotaan lisäksi rakennusten vaikutuksesta ilmastonmuutokseen mm. mistä rakennusten aiheuttamat päästöt muodostuvat ja miten päästöt jakautuvat rakennuksen elinkaaren ajalle. Tietoperustan toisessa osiossa, luvussa 4, keskitytään rakentamisen päästövähennyskeinoihin ja kuvataan alkuun päästövähennyskeinoja yleisimpien rakennusmateriaalien osalta. Suunnitteluvaiheen merkitystä rakennuksen elinkaaren hiilijalanjälkeen kuvataan erityisesti rakennuksen käytönaikaisen energiankulutuksen näkökulmasta mutta huomiota kiinnitetään myös rakennuspaikan valinnan hiilijalanjälkivaikutukseen. Tietoperustan viimeisessä osiossa esitellään Ympäristöministeriön julkaisemaa ”Rakennuksen vähähiilisyyden arviointimenetelmää”, jota käytetään myös tämän työn hiilijalanjälkilaskelmissa.

2.3 Kehittämistyön tutkimusmenetelmät

Tutkimukselliselle kehittämistoiminnalle on ominaista, että tiedontuotantoa ohjaavat käytännön ongelmat ja kysymykset. Tutkimuksellinen kehittämistyö yhdistää sekä konkreettista kehittämistoimintaa, että tutkimuksellisten menetelmien soveltamista ja aineiston analyysiä. (Toikko & Rantanen 2009, 21–22.) Opinnäytetyö on tutkimuksellista kehittämistoimintaa, sillä lähtökohtana on

työelämästä nousevat kysymykset, joita ovat tässä tapauksessa kysymys laskennan kohteena olevan rakennuksen peruskorjauksen hiilijalanjäljen muodostumisesta sekä peruskorjatun rakennuksen hiilijalanjäljen vertautumisesta vastaavan uudisrakennuksen hiilijalanjälkeen. Tutkimuksen toteuttamiseksi tuotetaan laskenta-aineistoa, jota tulkitaan havainnoimalla ja refleктоimalla.

Opinnäytetyön tutkimusmenetelmänä käytetään näin ollen sekä kvantitatiivisia että kvalitatiivisia puolia sisältävää tapaustutkimusta. Tapaustutkimuksessa tutkitaan syvällisesti yhtä tai muutamaa kohdetta ja näitä yksittäisiä tapauksia syvällisesti tulkitsemalla haetaan tietoa mm. ilmiöön liittyvän toiminnan lainalaisuuksista (Tapaustutkimus 2022).

Peruskorjaustapauksen hiilijalanjäljen laskenta suoritetaan Ympäristöministeriön yksinkertaistulla hiilijalanjäljen arviointimenetelmällä. Uudisrakennuksen hiilijalanjälkitietona käytetään aihepiirin tutkimuskirjallisuudesta saatua kahta erilaista uuden opetusrakennuksen hiilijalanjälkitietoa. Hiilijalanjäljen laskennassa tarvittavan ostoenergiankulutuksen ja mm. rakenteiden lämmönläpäisykertoimen määrittämisessä hyödynnetään D.O.F. tech Oy:n ja Saint-Gobain Finland Oy:n tarjoamaa laskentapalvelua (www.laskentapalvelut.fi).

2.4 Aineiston kuvaus ja analyysi

Opinnäytetyön tutkimusaineistona toimivat laskentakohteesta tehtävät hiilijalanjälkilaskelmat. Hiilijalanjälkilaskelmat tehdään Ympäristöministeriön vuoden 2019 rakennuksen vähähiilisyyden arviointimenetelmällä ja laskentaa ohjaavana aineistona käytetään Ympäristöministeriön julkaisua ”Rakennuksen vähähiilisyyden arviointimenetelmä”, julkaisu on saatu Ympäristöministeriön verkkosivuilta. Hiilijalanjäljen laskentaan ei ollut käytössä varsinaista työkalua ja näin ollen laskenta tehtiin alusta asti itse Excel-taulukkolaskentaohjelmalla. Laskennan kohteeksi määritettiin 1970-luvulla rakennettu opetusrakennus. Kohderakennuksen geometria pohjautui olemassa olevaan 1960-luvun lopulla valmistuneeseen opetusrakennukseen, geometriaa muokattiin kuitenkin hieman, jotta rakennus vastaisi paremmin 1970-luvun rakennusta. Rakennuksen peruskorjauksen ja uudisrakentamisen hiilijalanjäljen vertailussa tarvittava opetuskäyttöön tarkoitettun uudisrakennuksen hiilijalanjälkitietoina on käytetty Huuhkan ja muiden (2021, 46) ja Bionova Oy:n (2012, 17) tutkimuksissa esitettyjä hiilijalanjälkitietoja. Opinnäytetyössä tuotettavan tutkimusaineiston (hiilijalanjälkilaskelmien) analyysimenetelminä käytetään laadullisen analyysin menetelmiä, joissa analyysi muodostetaan eritasoisten tulkintojen kautta, keskittyen havaintoihin, pohdintaan ja tulosten reflektointiin.

3 Rakentaminen ja ilmastonmuutos

3.1 Kasvihuonekaasujen ilmastovaikutus

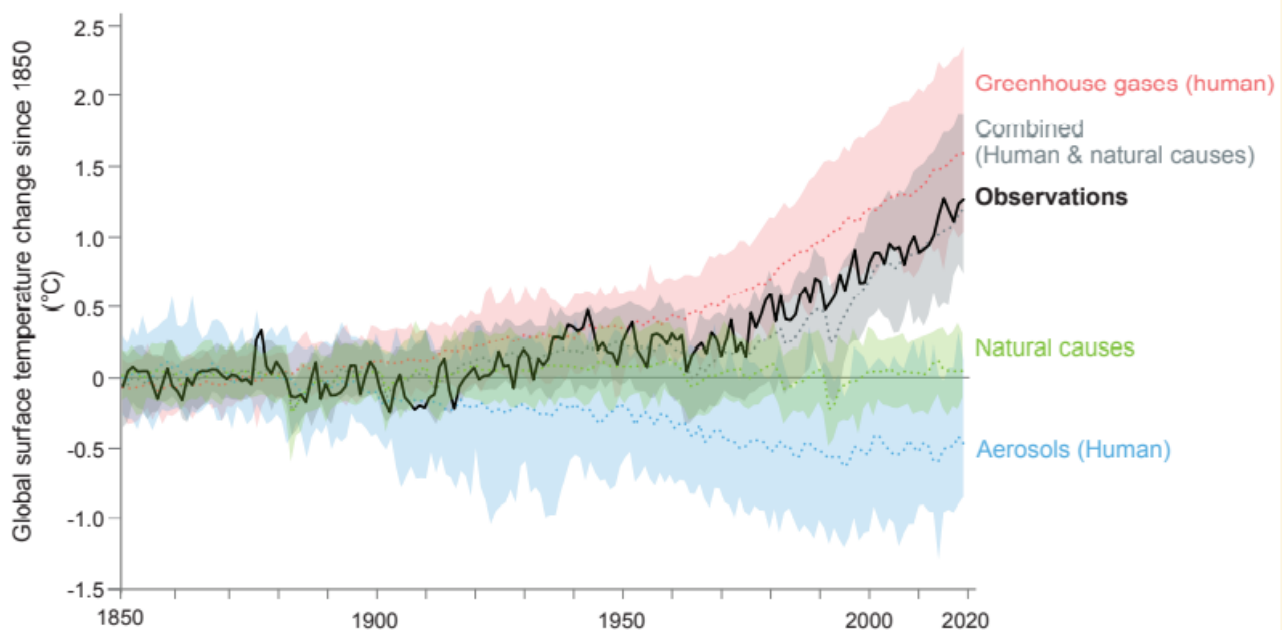
Ilmastonmuutoksen seurauksena maapallon keskimääräinen lämpötila on noussut noin yhdellä asteella esiteolliseen aikaan verrattuna. Lämpötilan nousu aiheuttaa ongelmia laaja-alaisesti ihmisille, eläinkunnalle ja luonnolle. Lämpötilan nousun seurauksena esiintyy yhä enemmän mm. sään ääri-ilmiöitä: myrskyjä, tulvia ja kuivuutta. Jäätikköjen sulamisen ja valtamerien lämpölaajenemisen seurauksena merenpinnan ennustetaan nousevan Euroopassa keskimäärin 60–80 cm. Makean veden saatavuus heikkenee yleisesti merenpinnan nousun, kuivuuden ja rankkasateiden seurauksena. Biodiversiteetti köyhtyy mm. eläin- ja kasvilajien elinkaaren, niiden levinneisyyden ja monipuolisuuden muutosten seurauksena. (EU:n ratkaisut ilmastonmuutoksen ehkäisemiseksi 2022.)

Edellä mainitut maapallon lämpenemisen aiheuttamat muutokset ovat vain yksittäisiä esimerkkejä ilmastonmuutoksen arvioiduista vakavista vaikutuksista. Ilmastonmuutoksen hillitsemiseksi maapallon lämpeneminen tulisi pysäyttää reilusti alle kahteen celsiusasteeseen esiteolliseen aikaan verrattuna. Tavoitteen saavuttamiseen pyritään mm. Pariisin ilmastosopimuksen avulla. Vuonna 2015 solmitussa ilmastosopimuksessa sopimuksen allekirjoittaneet maat ovat sitoutuneet oikeudellisesti vähentämään kasvihuonekaasupäästöjä siten, että lämpeneminen pysähtyy reilusti alle kahteen asteeseen. Sopimuksen mukaan allekirjoittaneiden maiden tulee lisäksi pyrkiä aktiivisesti eri keinoin rajoittamaan maapallon lämpeneminen enintään 1,5 asteeseen esiteolliseen aikaan verrattuna, sillä tällä on ratkaiseva vaikutus ilmastonmuutoksen aiheuttamien muutosten haittoihin (The Paris Agreement 2015, 3).

Merkittävin syy ilmastonmuutokseen ja sitä seuranneeseen maapallon lämpenemiseen on ilmakehän kasvihuonekaasujen määrän kasvu (Summary for Policymakers 2021, 4). Kasvihuonekaasupäästöjä tulee luonnosta sekä ihmisen toiminnan seurauksena. Luontoperäisinä päästölähteinä toimivat esimerkiksi kasvit, jotka soluhengityksen ja maatumisen yhteydessä vapauttavat ilmakehään kasvihuonekaasuja. (About greenhouse gases 2022.) Ihmisen toiminnan vaikutus kasvihuonekaasupäästöjen lisääntymiseen on kuitenkin merkittävästi luontoa suurempi. Hallitustenvälisen ilmastopaneelin IPCC:n vuoden 2021 ilmastoraportin mukaan suurin osa kasvihuonekaasupäästö-

jen kasvusta on peräisin ihmisen toiminnasta mm. fossiilisten polttoaineiden poltosta ja maankäytöstä (Climate Change 2021 2022, 515). Yleisesti voidaan todeta, että ihmisen toiminnassa kasvihuonekaasuja syntyy tuotteiden ja palveluiden tuottamisen ja käyttämisen yhteydessä.

Ihmisen toiminnan tuottamien kasvihuonekaasupäästöjen kasvun vaikutus näkyy selvästi kuviossa 1, joka havainnollistaa maanpinnan keskimääräisen pintalämpötilan muutoksen ja ihmisen sekä luonnollisten tekijöiden ilmastovaikutusten välistä yhteyttä. Kuvion 1 musta käyrä esittää maapallon keskimääräisen pintalämpötilan muutoksen kehittymistä aikavälillä 1850–2019. Kuvion väritetyt alueet esittävät IPCC:n ilmastomallin simulaatioiden mukaista eri tekijöiden aiheuttamaa keskimääräisen lämpötilan muutosta seuraavasti: punainen alue (ihmisen tuottamat kasvihuonekaasut), vihreä alue (luonnolliset tekijät), sininen (ihmisen tuottamat aerosolit) ja harmaa (ihmisen toiminnan ja luonnollisten tekijöiden yhteisvaikutus). (Mts. 516). Kuviosta on nähtävissä, että mitattu maapallon pintalämpötilan mittauskäyrä toteutuu vain silloin, kun huomioidaan ihmisen ja luonnollisten tekijöiden toiminnan simuloitu yhteisvaikutus.



Kuvio 1. Maapallon keskimääräisen pintalämpötilan kehittyminen ja ihmisen sekä luonnollisten tekijöiden vaikutus pintalämpötilaan aikavälillä 1850–2019 (Climate Change 2021 2022, 516).

Kasvihuonekaasut lisäävät kaksivaikutteisesti maapallon lämpenemistä; kaasut läpäisevät aurion-
gonsäteilyä ja toisaalta absorboivat maanpinnan lämpösäteilyä. Näin ollen ilmakehän kasvihuone-
kaasujen määrän lisääntyessä maanpinnalle säteilee enemmän auringon lämpösäteilyä kuin maan-
pinnalta vastavuoroisesti säteilee pois. Ilmiö muistuttaa luonteeltaan kasvihuoneen
toimintaperiaatetta ja siksi ilmiötä kutsutaankin tunnetusti kasvihuoneilmiöksi. (Ilmastomuutok-
sen syyt 2022.) Kasvihuonekaasuista puhuttaessa esille nousee usein hiilidioksidi (CO_2). Hiilidioksidi
on kuitenkin vain yksi ilmaston lämpenemistä merkittävimmin kiihdyttävistä kasvihuonekaasuista,
muuta pitkäaikaisia merkittävästi kasvihuoneilmiötä kiihdyttäviä kaasuja ovat metaani (CH_4) ja di-
typpioksidi (N_2O) (Kasvihuonekaasut 2022). Kasvihuonekaasuiksi määritellään myös mm. tropo-
sfäärin otsoni, fluoratut kasvihuonekaasut sekä vesihöyry (Tulevaisuussanasto – kasvihuonekaasu
2022).

Kasvihuonekaasujen ilmastoa lämmittävässä vaikutuksessa on eroja koska vaikutus riippuu kaasu-
jen kyvystä absorboida maanpinnan lämpösäteilyä sekä kaasujen kyvystä säilyä ilmakehässä. Kaa-
sujen ilmastoa lämmittävää vaikutusta kuvataan lämmityspotentiaalien GWP (Global Warming Po-
tential) avulla. Lämmityspotentiaali ilmaistaan lämmityspotentiaalikertoimenä, joka kuvaa
kasvihuonekaasun kykyä absorboida maanpinnan lämpösäteilyä valitun tarkastelujakson aikana,
tarkastelujakson pituutena käytetään tyypillisesti sataa vuotta (GWP100). Lämmityspotentiaaliker-
roin on suhteellinen lukuarvo (indeksi), jossa kaasun absorbointikyvyn vertailutasona tarkastelu-
jakson aikana käytetään hiilidioksidia. Hiilidioksidin ilmastoa lämmittävä vaikutus on valittu vertai-
lutasoksi, koska hiilidioksidi voi säilyä ilmakehässä arviolta jopa tuhansia vuosia. (Understanding
Global Warming Potentials 2022.)

Koska hiilidioksidin ilmastovaikutus on valittu vertailutasoksi, käytetään sen lämmityspotentiaali-
kertoimen indeksinä lukuarvoa 1. Esimerkiksi metaanin lämmityspotentiaalikertoimen indeksinä
sadan vuoden aikana (GWP100) käytetään puolestaan indeksinä 28. Metaanin indeksi (28) kuvaa
sitä, että metaanin kumulatiivinen ilmastoa lämmittävä vaikutus sadan vuoden aikana on 28 ker-
taa suurempi kuin hiilidioksidilla (Climate Change 2014: Synthesis report 2015, 87). Ilmaston kan-
nalta metaani on siis hiilidioksidia merkittävästi haitallisempi kasvihuonekaasu. Kasvihuonekaasu-
jen lämmityspotentiaalikertoimien indeksit ovat hallitustenvälisen ilmastopaneelin IPCC:n

määrittämiä kertoimia, joita päivitetään tarvittaessa IPCC:n ilmastomuutoksen arviointiraporteissa. Tällä hetkellä voimassa olevat kertoimet ovat IPCC:n viidennestä vuonna 2015 julkaistusta arviointiraportista, kuudes arviointiraportti julkaistaan kokonaisuudessaan vuoden 2022 aikana.

3.2 Hiilijalanjälki ilmastokuormituksen mittana

Koska merkittävin osa ilmastomuutoksesta ja siitä seuranneesta maapallon lämpenemisestä on ihmisen toiminnasta johtuvaa, tulee kasvihuonekaasupäästöjen vähentämiseksi pyrkiä ensisijaisesti vähentämään ihmisen tuottamia päästöjä. Ihmisen toiminnasta aiheutuvien kasvihuonekaasupäästöjen määrää kuvataan hiilijalanjäljellä. Hiilijalanjälki kuvaa erityisesti ilmaston lämpenemisen kannalta haitallisimpien kasvihuonekaasujen, hiilidioksidin (CO₂), metaanin (CH₄) ja dityppioksidin (N₂O) ilmastoa lämmittävää yhteisvaikutusta. (Mitä nämä käsitteet tarkoittavat? 2022.)

Hiilijalanjäljen yksikkönä käytetään hiilidioksidiekvivalenttia [CO₂e], eli hiilijalanjäljessä eri kasvihuonekaasujen ilmastoa lämmittävä vaikutus yhteismitallistetaan hiilidioksidin lämmittävän vaikutuksen kanssa. Hiilijalanjäljen laskennassa edellä kuvattu kasvihuonekaasujen ilmastovaikutuksen yhteismitallistaminen toteutetaan lämmityspotentiaalikertoimien GWP (Global warming potential) avulla, lämmityspotentiaalikertoimia on saatavilla esimerkiksi tuotevalmistajien ympäristöselosteista EPD (Environmental Product Declarations). (Mts.) Rakentamisen hiilijalanjälkilaskentaa varten on Suomen ympäristökeskuksen toimesta kehitetty myös päästötietokanta (Rakentamisen päästötietokanta), johon on koottu rakennuksen elinkaaren hiilijalanjäljen laskennassa tarvittavia lämmityspotentiaalikertoimia (Rakentamisen päästötietokanta 2022). Rakennuksen elinkaaren hiilijalanjälkilaskennassa lämmityspotentiaalikertoimia tarvitaan rakennusmateriaaleille, järjestelmille, energialle, rakentamistyölle, kuljetuspalveluille sekä rakennuksen purkamiselle ja jätteenkäsittelylle.

Hiilijalanjälkilaskennan hyödyntäminen ihmisen aiheuttaman hiilidioksidikuormituksen mittaukseksi ei rajoitu vain yksilötasolle, vaan laskennalla voidaan mitata myös laajempien kokonaisuuksien, kuten esimerkiksi yritysten tai organisaatioiden hiilijalanjälkeä (Tulevaisuussanasto – hiilijalanjälki 2022). Hiilijalanjälkilaskentaa voidaan tehdä toisaalta myös rajatulle aikavälille, esimerkiksi tuotteen valmistusvaiheelle, jolloin laskentaan sisällytetään päästöt raaka-aineen

hankkimisesta, kuljettamisesta ja valmistusprosessista. Hiilijalanjäljen suuruutta voidaan tarkastella myös vertaamalla sitä eri suureisiin, kuten pinta-alaan, tilavuuteen tai aikaan. Esimerkkinä edellisestä, rakentamisen hiilijalanjälkitarkasteluissa hiilijalanjälkilaskenta tehdään koko rakennuksen elinkaaren ajalle ja hiilijalanjälkilaskenta ilmaisee tällöin, kuinka monta kilogrammaa hiilidioksidiekvivalenttia kohdistuu rakennuksen yhdelle lämmitetylle neliömetrille vuodessa [$\text{kgCO}_2\text{e/m}^2/\text{a}$] (Rakennuksen vähähiilisyyden arviointimenetelmä 2019, 34).

3.3 Rakennusten vaikutus ilmastonmuutokseen

Rakentamisella on merkittävä ilmastonmuutosta kiihdyttävä vaikutus. Rakennusten ja rakentamisen energiankulutuksen on arvioitu muodostavan noin kolmanneksen maailman energiankulutuksesta ja aiheuttavan lisäksi lähes 15 % suorista kasvihuonekaasupäästöistä (Buildings 2022). Euroopan unionin alueella rakennussektorin on arvioitu muodostavan puolestaan lähes 40 % kokonaisenergiankulutuksesta ja 36 % hiilidioksidipäästöistä (In focus: Energy efficiency in buildings 2022). Rakennussektorin energiankulutuksen ja hiilidioksidipäästöjen määrän odotetaan kasvavan entisestään jäähdytystarpeen kasvaessa ilmastonmuutoksen seurauksena trooppisen ilmaston alueilla. Myös esimerkiksi kehittyvien maiden energiankulutuksen lisääntyminen sekä rakennetun pinta-alan nopea kasvu lisäävät rakennussektorin hiilidioksidipäästöjä (Buildings 2022).

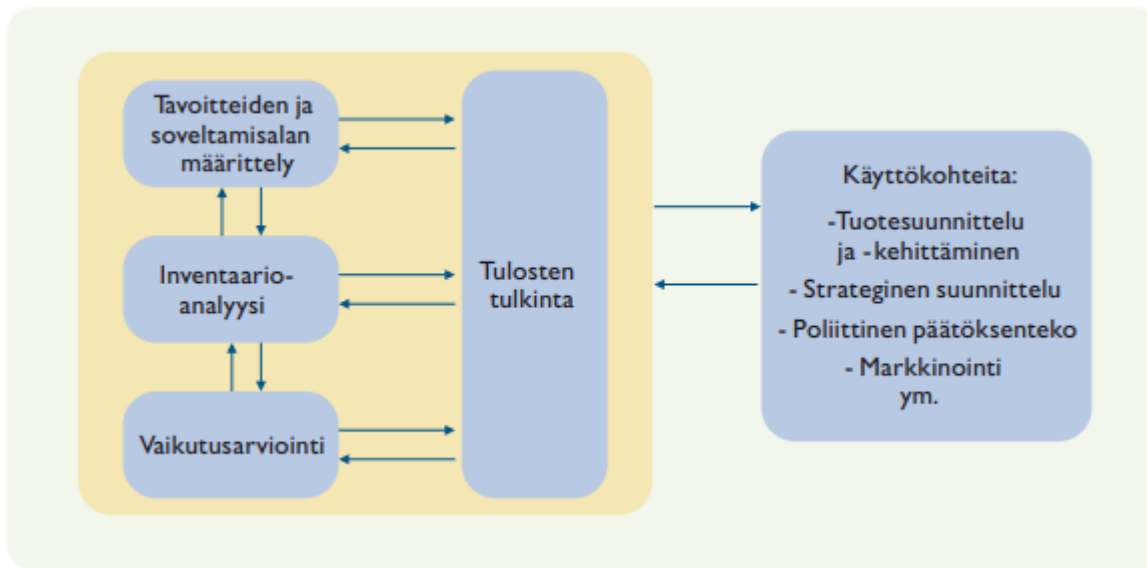
Rakentamisen ympäristövaikutukset eivät rajaudu pelkästään energiankulutukseen ja kasvihuonekaasupäästöihin ylipäänsä, vaan rakentamisessa kulutetaan aina myös mm. maapallon raaka-ainevaroja. Taloudellisen yhteistyön ja kehityksen järjestön OECD:n vuoden 2018 katsauksen mukaan rakentaminen kuluttaa yli puolet maapallon raaka-aineista. Rakentamisen päästöjä voitaisiin vähentää materiaaleja kierrättämällä, sillä raaka-ainetuotanto on ylipäänsä merkittävästi ympäristöä saastuttavampaa kuin kierrätettyjen materiaalien käyttö. Katsauksessa arvioidaan lisäksi, että materiaalien käytön kokonaismäärä tulee kasvamaan maailmanlaajuisesti yli puolella vuoteen 2060 mennessä vuoden 2011 tasoon verrattuna. (Global Material Resources Outlook to 2060 2018, 3.) Tämä merkitsisi siten myös rakentamiseen kuluvien raaka-aineiden kulutuksen merkittävää kasvua.

3.4 Rakennuksen elinkaaren kasvihuonekaasupäästöt

Rakennusten vaikutusta ilmastonmuutokseen on pitkään tarkasteltu rakennusten käytön aikaisen energiatehokkuuden näkökulmasta. Energiatehokkuusvaatimusten kiristämällä käytön aikaista energiankulutusta on pyritty pienentämään ja siten vähentämään rakennusten aiheuttamia kasvihuonekaasupäästöjä. Suomessa energiatehokkuusvaatimuksia on osoitettu lainsäädännössä erityisesti uudisrakennuksille. Korjausrakentamisessa velvoite energiatehokkuuden parantamisesta on ollut sidottuna ensisijaisesti korjauksen luvanvaraisuuteen; mikäli rakennuksen korjaus on edellyttänyt rakennus- tai toimenpidelupaa, on rakennukselle voitu tietyin ehdoin asettaa energiatehokkuuden parantamisen velvoitteita (A 4/13). Rakennusten kasvihuonekaasupäästöjä tarkasteltaessa voidaan kuitenkin todeta, että rakennukset tuottavat päästöjä koko elinkaarensa ajan, eikä käytönaikaisen energiankulutuksen pienentämiseen pyrkivällä lainsäädännöllisellä ohjaamisella pienennetä riittävästi rakennusten kasvihuonekaasupäästöjä EU:n ja Suomen päästövähennystavoitteiden saavuttamiseksi. Ohjaavan lainsäädännön näkökulmaa rakennusten aiheuttamista kasvihuonekaasupäästöistä onkin ollut tarpeen laajentaa ilmastonmuutoksen kiihtyessä ja kiristyvien globaalien päästövähennystavoitteiden myötä rakennuksen koko elinkaaren ajalle. (Eduskunta hyväksyi rakentamisen päästöjä pienentävät ja digitalisaatiota edistävät lait 2023.)

3.4.1 Elinkaariarviomenetelmä rakennusten ympäristövaikutusten arvioinnissa

Rakennuksen ympäristövaikutuksien arvioinnissa sovelletaan elinkaariarviomenetelmää LCA (Life Cycle Assessment). Elinkaariarviomenetelmä on kansainvälisillä ISO-standardilla määritelty menetelmä, jossa arvioidaan tuotteen tai palvelun elinkaaren aikana aiheutuvia ympäristövaikutuksia neljän päävaiheen avulla. Elinkaariarviomenetelmässä ympäristövaikutuksilla tarkoitetaan tuotteesta tai palvelusta syntyvien päästöjen aiheuttamia ympäristön muutoksia päästöjen vapautuessa veteen, maaperään tai ilmaan. Näiden lisäksi ympäristövaikutukset huomioivat myös resurssien kulutuksen. Alla esitetyn kuvion 2 mukaisesti elinkaariarviomenetelmän neljä päävaihetta ovat: arvion tavoitteen ja soveltamisalan määrittely, inventaarioanalyysi, vaikutusarviointi ja tulosten tulkinta. (Elinkaariarviointi, jalanjäljet ja panos-tuotosmalli 2013.)



Kuvio 2. ISO 14040:2006 -standardin mukaiset elinkaariarvioinnin vaiheet (Koskela, Sokka, Korhonen, Mattila & Soimakallio 2010, 17).

Elinkaariarvioinnin ensimmäisessä vaiheessa määritetään, mitä arvioinnilla ylipäänsä tavoitellaan ja missä ympäristössä arviointimenetelmää sovelletaan, mitkä ovat arvioinnin syyt, rajaukset mm. tarkastelujakson pituus ja mitä arvioinnin raportointi tulee sisältämään (Koskela ym. 2010, 17). Esimerkiksi arvioinnin tavoitteeksi voidaan määrittää rakennuksen elinkaaren aikana muodostuvien kasvihuonekaasupäästöjen arviointi 50 vuoden pituisen tarkastelujakson aikana ja raportissa kasvihuonekaasut ilmoitetaan yhteismitallistettuna hiilijalanjälkenä eli hiilidioksidiekvivalenttina.

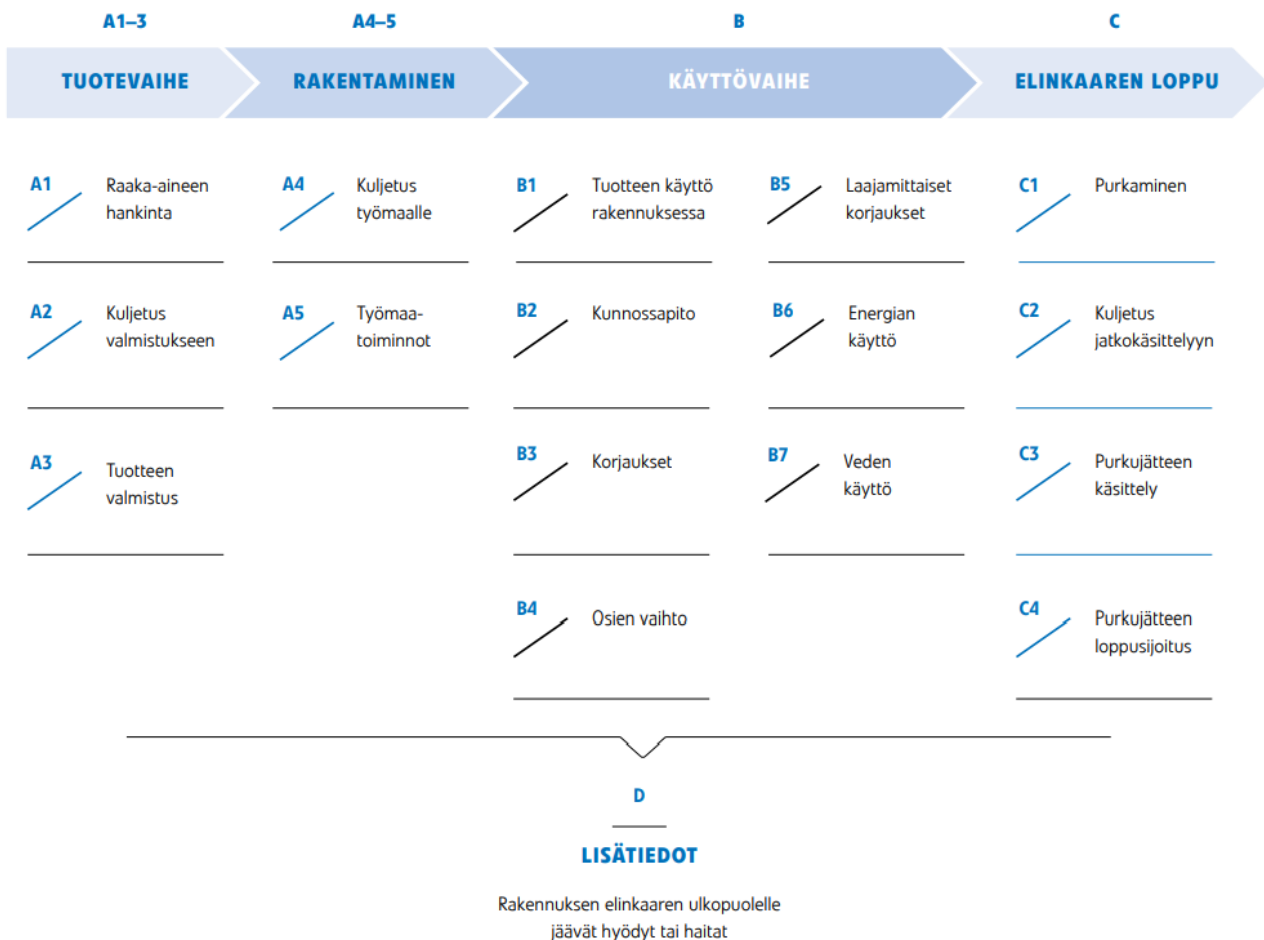
Toisessa vaiheessa tehdään inventaarioanalyysi LCI (Life Cycle Inventory), jossa ympäristövaikutusten arvioimiseksi tuotteen elinkaari pilkotaan yksittäisiin prosesseihin nk. yksikköprosesseihin. Yksikköprosesseissa tarkastellaan tuotteeseen sijoitettuja panoksia ja niiden seurauksena syntyviä tuotoksia. Panoksia ovat esimerkiksi tuotteen valmistamiseksi käytetyt raaka-aineet ja niiden hankkimiseen kulutettu energia (polttoaineet). Tuotoksia ovat puolestaan prosessissa valmistunut tuote, esim. rakennustuote, ja sen tuottamisen ohessa syntyneet ympäristön kannalta negatiiviset tuotokset, kuten kasvihuonekaasupäästöt ja jätteet. Inventaarioanalyysissä yksikköprosessien tiedot pohjautuvat vertailuyksikön käyttöön, johon suhteuttamalla inventaariotiedot saadaan laskettua. Vertailuyksikkönä voi olla esimerkiksi yksi kilo tuotetta. (Elinkaariarviointi, jalanjäljet ja panos-tuotosmalli 2013.)

Elinkaariarvion kolmannessa vaiheessa tehdään vaikutusarviointia LCIA (Life Cycle Impact Assessment). Vaikutusarvioinnissa tarkastellaan inventaarioanalyysin tietoihin pohjaten tuotteen potentiaalisia vaikutuksia vaikutusindikaattoreihin. Vaikutusindikaattorit ovat jaettu kahteen eri luokkaan: keskipisteindikaattoreihin ja loppupisteindikaattoreihin. Keskipisteindikaattorit sisältävät tuotteen potentiaaliset vaikutukset ilmastonmuutokseen, happamoitumiseen, rehevöitymiseen, otsonikatoon, fotokemialliseen otsonin muodostumiseen, abioottisten raaka-aineiden kulumiseen sekä veden käyttöön. Loppupisteindikaattorit ovat puolestaan yleisesti arvokkaiksi ja suojelua edellyttäviksi miellettyjä kohteita kuten luonnonvarat, ympäristö ja ihmisten terveys. Vaikutusarvioinnissa eri vaikutusluokkiin jaotellut inventaariotiedot yhteismitallistetaan ominaiskertoimien avulla. (Koskela ym. 2010, 17.) Käytännössä tässä vaiheessa esimerkiksi tuotteen valmistuksessa syntyneiden eri kasvihuonekaasujen ilmastoa lämmittävä vaikutus yhteismitallistetaan hiilidioksidin vastaavan vaikutuksen kanssa lämmityspotentiaalikerroimia GWP hyödyntäen ja tuloksena saadaan tuotteen valmistusvaiheen hiilijalanjälki kiloina hiilidioksidiekvivalenttia [kgCO_2e].

Elinkaariarviomenetelmän neljännessä vaiheessa tulkitaan arvioinnilla saavutettuja tuloksia ja tehdään niiden pohjalta johtopäätöksiä ja toimenpide-ehdotuksia. Tulkintavaiheessa tarkastellaan lisäksi arvioon vaikuttavia tekijöitä ja tehdään epävarmuustarkastelua erityisesti arviointiprosessissa käytettyihin lähtötietoihin ja menetelmiin liittyen. Elinkaariarviomenetelmä on luonteeltaan iteratiivinen, mistä johtuen tulosten tulkintaa tulee tehdä jatkuvasti menetelmän eri vaiheiden yhteydessä. (Koskela ym. 2010, 17.)

Rakennuksen elinkaaren kasvihuonekaasupäästöjä tarkasteltaessa elinkaaren katsotaan jakautuvan neljään eri vaiheeseen kuviossa 3 esitetyn mukaisesti. Vaiheiden tunnuksina käytetään A1-A3, A4-A5, B, C. Elinkaaren ensimmäisessä vaiheessa (A1-A3) valmistetaan rakentamisessa käytettävät tuotteet ja vaihetta kutsutaan tuotevaiheeksi. Tuotevaihe sisältää rakennustuotteiden koko valmistusprosessin: raaka-aineiden hankkimisen, raaka-aineiden kuljettamisen valmistukseen ja lopuksi tuotteiden valmistamisen. Elinkaaren toinen vaihe on rakentamisvaihe (A4-A5). Rakentamisvaiheeseen sisältyy rakennustuotteiden kuljettaminen työmaalle ja työmaatoiminnot. Kolmas vaihe on käyttövaihe (B), joka on sisällöltään rakennuksen elinkaaren vaiheista laajin. Käyttövaiheessa huomioidaan tuotteiden käyttö rakennuksessa, kunnossapidolliset toimenpiteet kuten korjaukset ja osien vaihdot, laajamittaiset korjaukset sekä energian ja veden käyttö. Elinkaaren viimeisin vaihe on elinkaaren loppuvaihe (C), johon sisältyy rakennuksen purkaminen, purkamisesta

syntyvän jätteen kuljetus jatkokäsittelyyn sekä lopuksi purkujätteen käsittely ja loppusijoitus. (EN 15978:2011 2012.)



Kuvio 3. EN 15978 -standardin mukaiset rakennuksen elinkaaren vaiheet (Johdatus rakennusten elinkaariarviointiin n.d., 16).

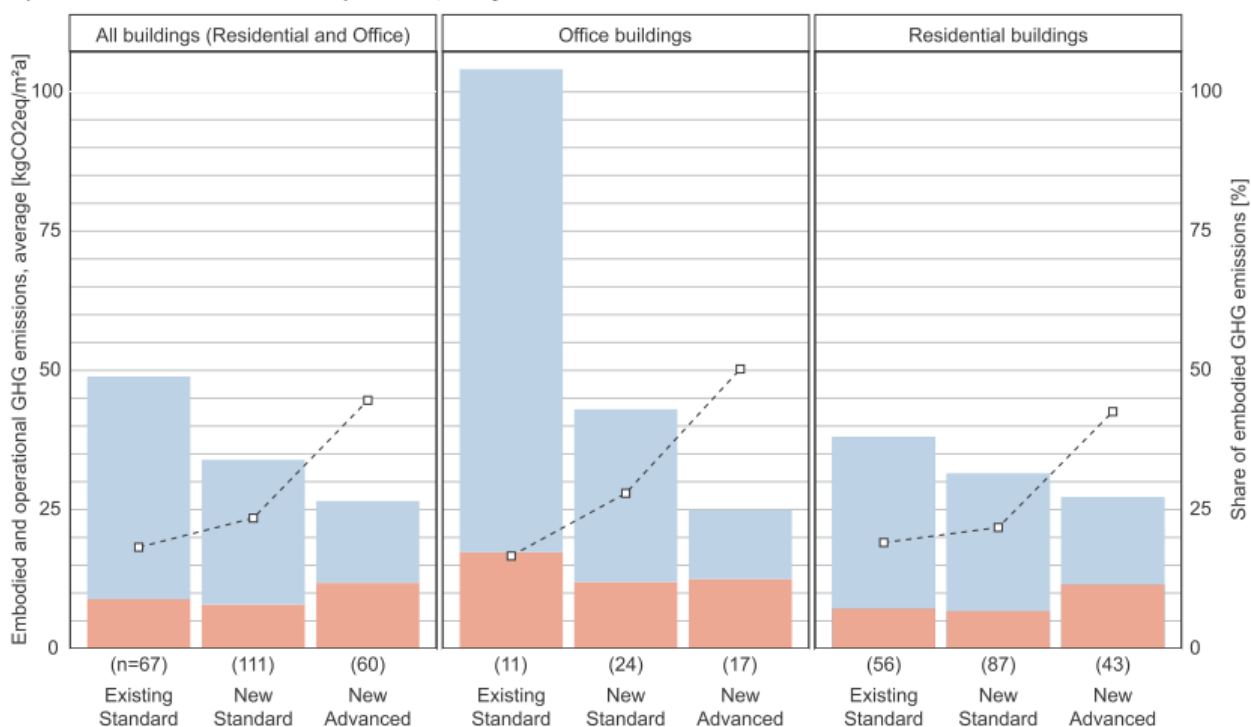
3.4.2 Elinkaaren vaiheiden hiilijalanjälki

Tutkimuskirjallisuudessa rakennuksen elinkaaren päästöt luokitellaan usein rakennustuotteisiin liittyviin päästöihin ja energiankulutukseen liittyviin päästöihin, näistä kahdesta käytetään termejä tuotesidonnaiset päästöt (engl. embodied GHG emissions) ja käyttösidonnaiset päästöt (engl. operational GHG emissions). Tuotesidonnaisilla päästöillä tarkoitetaan päästöjä, joita aiheutuu tuotteiden valmistamisessa raaka-aineiden hankkimisesta alkaen, tuotteiden kuljetuksista, rakentamisesta, käytönaikaisista ylläpidollisista korjauksista ja tuotteiden uusimisista sekä purkamisesta ja

jätteenkäsittelystä. Tuotesidonnaisia päästöjä muodostuu näin ollen rakennuksen kaikissa elinkaaren vaiheissa: A1-A3, A4-A5, B ja C. Käytösidonnaisilla päästöillä viitataan puolestaan rakennuksen lämmön- ja sähkönkulutuksen aiheuttamiin päästöihin, joita muodostuu rakennuksen elinkaaren käyttövaiheessa (B). (Röck, Ruschi Mendes Saade, Balouktsi, Nygaard Rasmussen, Birgisdottir, Frischknecht, Habert, Lützkendorf & Passer 2020, 1–3.)

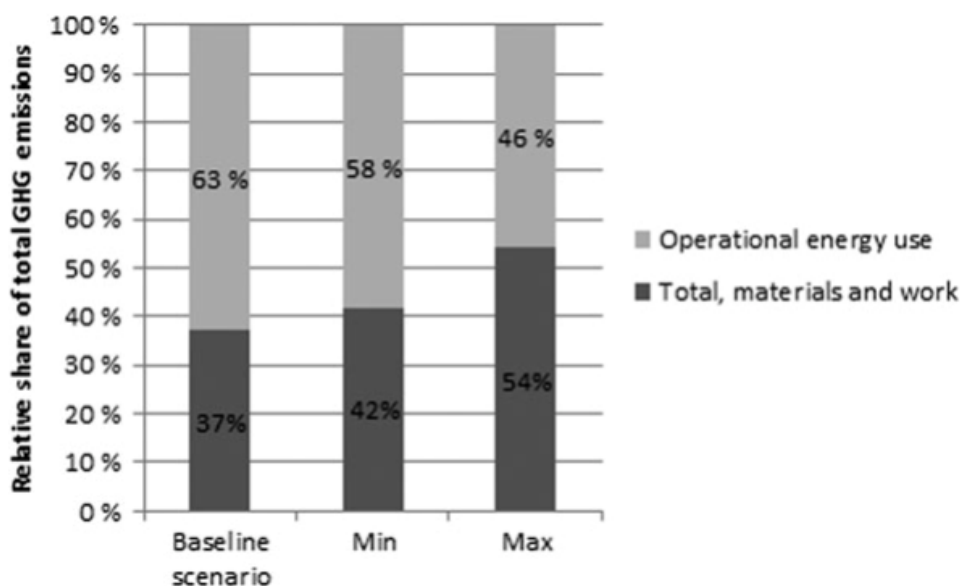
Rakennuksen elinkaaren vaiheilla on erisuuruiset hiilijalanjäljet. Aiheesta tehdyissä tutkimuksissa korostuu erityisesti käyttövaiheen energiankulutuksen hallitseva osuus rakennusten elinkaaren hiilijalanjäljessä. Röckin ja muiden yli 650:n rakennuksen elinkaariarvioita analysoivassa ja rakennusten globaaleja kasvihuonekaasutrendejä selvittävässä tutkimuksessa energiatehokkuudeltaan perustasoa olevissa rakennuksissa rakennusten elinkaaren tuotesidonnaisten kasvihuonekaasupäästöjen osuudeksi arvioitiin vain 20–25 % käytösidonnaisten päästöjen ollessa 75–80 % (kuvio 4) (Röck ym. 2020, 6). Tutkimuksen mukaan nämä ennen tiukentuneita energiatehokkuusvaatimuksia valmistuneet rakennukset muodostavat suurimman osan maailman rakennuskannasta (mts. 5). Röck ja muut esittävät tutkimuksessaan myös, että tuotesidonnaisten päästöjen osuus on suurempi energiatehokkaammissa passiivi-, matala- ja nollaenergiarakennuksissa. Tämä johtuu pääosin siitä, että energiatehokkaammissa rakennuksissa elinkaaren aikainen energiankulutus on pienempää, mikä aiheuttaa pienemmät käytösidonnaiset päästöt ja johtaa tuotesidonnaisten päästöjen osuuden kasvamiseen. (Mts. 7.)

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



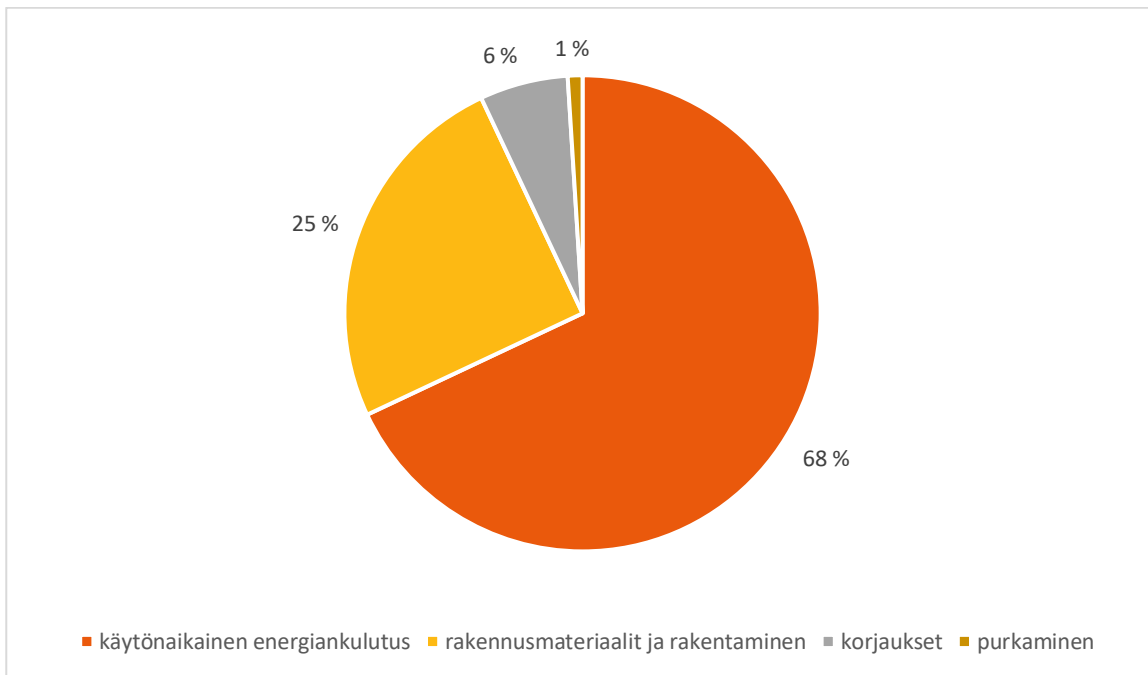
Kuvio 4. Rakennusten tuotesidonnaisten (punainen pylväs) ja käyttösidonnaisten (sininen pylväs) kasvihuonekaasupäästöjen jakautumisen trendi maailmanlaajuisesti tarkasteltuna. Katkoviivalla merkitty käyrä kuvaa tuotesidonnaisten päästöjen suhteellista osuutta rakennusten elinkaaren kokonaispäästöistä. (Röck ym. 2020, 6.)

Ruuskan ja Häkkisen (2015, 325) tutkimuksessa rakennuksen elinkaaren tuotesidonnaisten ja käyttösidonnaisten päästöjen suhteessa on havaittavissa vastaava trendi kuin Röckin ja muiden (2020, 6) tutkimuksessa; käyttösidonnaiset päästöt aiheuttavat lähtökohtaisesti suuremmat päästöt kuin tuotesidonnaiset päästöt ja tuotesidonnaisten päästöjen osuus kasvaa rakennuksen energiatehokkuuden parantuessa (kuvio 5). Ruuskan ja Häkkisen (2015) tutkimuksessa esitetyn parametrisen tapaustutkimuksen mukaan energiatehokkuudeltaan A-luokkaa olevan rakennuksen tuotesidonnaisten päästöjen osuus on 37 % ja käyttösidonnaisten osuus 63 %. Tutkimus korostaa erityisesti materiaalien valmistusvaiheen päästöjen merkittävää osuutta tuotesidonnaisista päästöistä; tarkastellussa tapaustutkimuksessa materiaalien valmistus muodostaa 70 % rakennuksen elinkaaren tuotesidonnaisista päästöistä. (Mts. 324–326.)

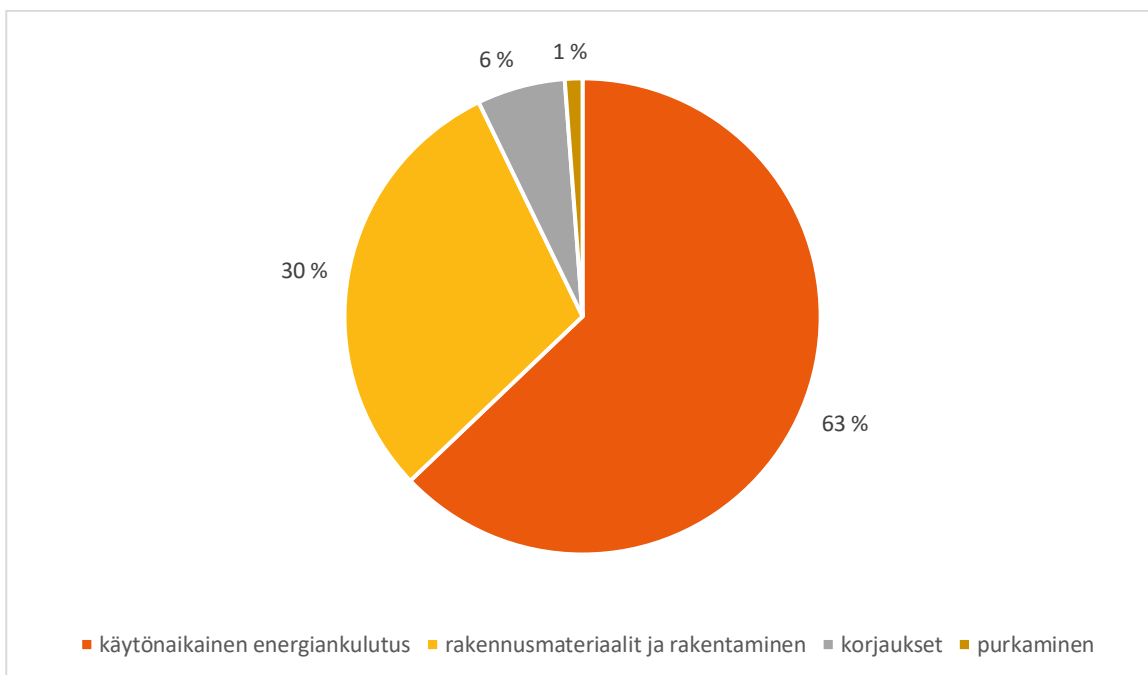


Kuvio 5. Tuotesidonnaisten ja käyttösidonnaisten kasvihuonekaasupäästöjen suhteellinen osuus rakennuksen elinkaaren kokonaispäästöistä energiatehokkuudeltaan eri tasoissa rakennuksissa. Vasemmalla on A-energialuokan rakennus, keskellä passiivitaso rakennus ja oikealla lähes nollaenergiatason rakennus. (Ruuska & Häkkinen 2015, 325.)

Rakennusmateriaalien valmistuksen ja rakennuksen käyttövaiheen energiankulutuksen suuret osuudet korostuvat myös tarkasteltaessa tuotesidonnaisten ja käyttösidonnaisten päästöjen jakautumista EN-standardin mukaisiin rakennuksen elinkaaren vaiheisiin (EN 15978:2011 2012). Rakennusteollisuuden vähähiilisyyden tiekartassa rakennuksen elinkaaren hiilijalanjälki jakautuu seuraavasti (kuvio 6): rakennusmateriaalit ja rakentaminen 25 %, käytön energiankulutus 68 %, korjaukset 6 % ja purkaminen 1 % (Laine, Raivio, Jonsson, Heino, Klimscheffskij & Lehtomäki 2020, 56–57). Ruuskan ja Häkkisen (2015, 324–326) tutkimuksessa elinkaaren vaiheiden suhteelliset osuudet ovat samaa suuruusluokkaa: rakennusmateriaalien valmistus ja rakentaminen 30 %, käytön energiankulutus 63 %, korjaukset 6 % ja purkaminen 1 %. Molempien lähteiden mukaan rakennusmateriaalien valmistus ja käyttövaiheen energiankulutus muodostavat yli 90 % rakennuksen elinkaaren päästöistä.



Kuvio 6. Rakennuksen elinkaaren hiilijalanjäljen jakautuminen elinkaaren eri vaiheisiin (Laine ym. 2020, 56–57).



Kuvio 7. Rakennuksen elinkaaren hiilijalanjäljen jakautuminen elinkaaren eri vaiheisiin (Ruuska & Häkkinen 2015, 324–326).

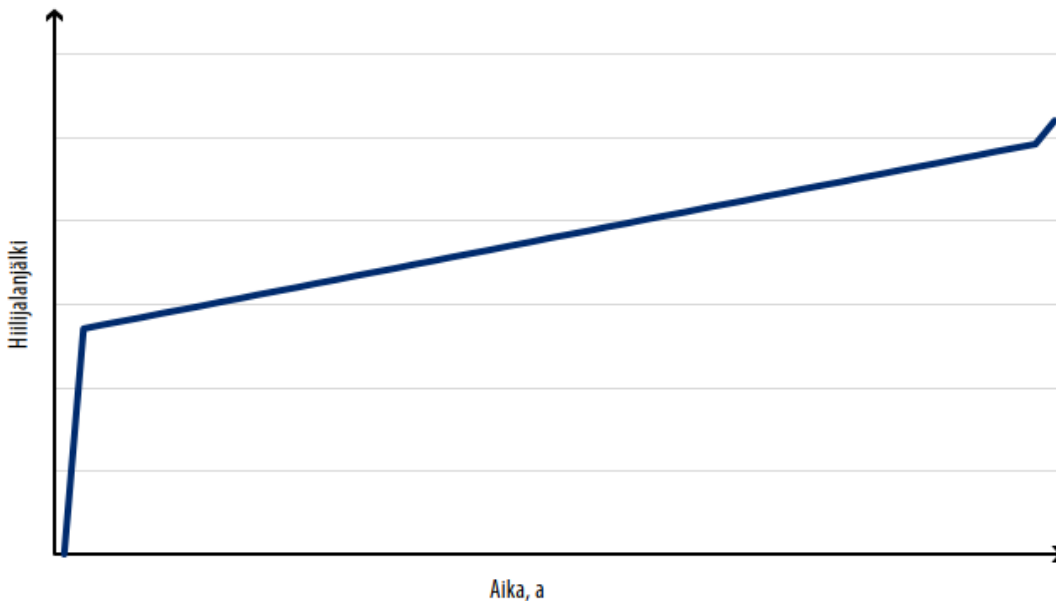
Materiaalien elinkaaren hiilijalanjäljen jakautumista rakennusosittain tarkasteltuna lähtökohtaisesti suurimman hiilijalanjäljen aiheuttavia rakennusosia ovat rakennuksen rungon osat: ulkoseinät ja vaakarakenteet (alapohjat, välipohjat ja yläpohjat) (Zimmermann, Andersen, Kanafani & Birgisdottir 2021, 28–30). Eri rakennusosien suhteellinen osuus materiaalien hiilijalanjäljestä on kuitenkin osin riippuvaista rakennustyyppistä, tämä pätee erityisesti vaakarakenteisiin. Esimerkiksi kerrostalon vaakarakenteiden hiilijalanjäljessä korostuvat välipohjien päästöt, ala- ja yläpohjan päästöjen ollessa selvästi pienemmät. Tämä johtuu siitä, että kerrostalossa välipohjien lukumäärä määräytyy rakennuksen kerrosluvun mukaan, kun taas alapohjien ja yläpohjien määrä pysyy samana kerrosluvun kasvaessa. Kerrostaloissa myös parvekkeilla ja väliseinillä voi olla merkittävä vaikutus kerrostalon hiilijalanjälkeen. (Ruuska, Häkkinen, Vares, Korhonen & Myllymaa 2013, 14.)

Koska rakennuksen hiilijalanjälki lasketaan lämmityspotentiaalikertoimilla (GWP), joissa hiilidioksidiekvivalentti ilmoitetaan painokiloa kohden, pohjautuu eri rakennusosien suhteellinen osuus rakennuksen materiaalien päästöistä pitkälti rakennusosien massojen suhteellisiin osuuksiin rakennuksen kokonaismassasta. Toisena vaikuttavana tekijänä on rakennusosien materiaalit; mikäli rakennusosa sisältää enemmän päästöjä aiheuttavia materiaaleja, kuten esimerkiksi lasia tai metalleja, rakennusosan suhteellinen osuus rakennuksen materiaali-päästöistä kasvaa ja rakennusosa voi pienemmästä massasta huolimatta aiheuttaa merkittäviä päästöjä rakennuksen elinkaaren aikana. (Ruuska ym. 2013, 14.)

3.5 Rakennusmateriaalien hiilijalanjälki

Ruuskan & Häkkisen (2015) sekä Röckin ja muiden (2020) tutkimuksissa osoitetaan, että rakennuksen elinkaaren alussa hiilijalanjäljessä esiintyy voimakasta kasvua. Tätä hiilijalanjäljen voimakasta kasvua kutsutaan yleisesti hiilipiikiksi (engl. carbon spike). Kuviossa 8 on kuvattu periaatteellisesti rakennuksen elinkaaren hiilijalanjäljen kasvu. Hiilipiikki on näkyvissä käyrän alkupäässä, jonka jälkeen hiilijalanjälki kasvaa lähinnä rakennuksen energiankulutuksen aiheuttamien päästöjen myötä. Hiilipiikki aiheutuu rakennusmateriaalien valmistuksen sekä rakennuksen rakentamisen päästöistä, elinkaaren alun hiilipiikki sisältää näin ollen rakennuksen alkuvaiheen tuotesidonnaisia päästöjä. Näistä kahdesta tekijästä rakennusmateriaalin valmistamisen päästöt muodostavat selvästi suuremman osan hiilipiikistä; esimerkiksi Ruuskan ja Häkkisen tutkimuksessa materiaalien valmistamisen päästöt ovat noin 87 % ja rakentamisen päästöt noin 13 % (Ruuska & Häkkinen 2015, 324–

326). Myös Huuhkan ja muiden uudisrakentamisen ja korjausrakentamisen hiilijalanjälkeä vertailevassa tutkimuksessa on päädytty vastaaviin suhdelukuihin, tutkimuksessa käsiteltävässä tapaustutkimuksessa uudisrakennuksen materiaalien valmistamisen osuus päästöistä on noin 90 % ja rakentamisen päästöt noin 10 % (Huuhka, Vainio, Moisio, Lampinen, Knuutinen, Bashmakov, Köliö, Lahdensivu, Ala-Kotila & Lahdenperä 2021, 22).



Kuvio 8. Rakennuksen hiilijalanjäljen kasvu elinkaaren aikana, periaatekuva (Huuhka ym. 2021, 22).

Hiilipiikkejä aiheutuu myös rakennuksen peruskorjausten yhteydessä. Peruskorjauksista aiheutuvat hiilipiikit ovat lähtökohtaisesti pienempiä kuin rakennuksen rakennusvaiheessa, uusien rakennusmateriaalien ja rakennustyön pienemmästä määrästä johtuen. Huuhkan ja muiden (2021, 23) mukaan peruskorjauksen hiilijalanjäljen suuruudessa on kuitenkin merkittävää vaihtelua. Hiilijalanjälkeä kasvattavat merkittävästi korjauksen laajuus, esimerkiksi rakenteiden uusiminen kantavaan runkoon asti, sekä korjauksen yhteydessä toteutettava laajennusrakentaminen ja käyttötarkoituksen muutokset (mts. 23).

Vaikka tuotesidonnaiset päästöt aiheuttavat tutkimusten mukaan yleisesti käyttösidonnaisia päästöjä pienemmät päästöt, voi tilanne muuttua tulevaisuudessa erityisesti energiatehokkaiden rakennusten osalta. Syinä tähän ovat erityisesti energiantuotannon hiilijalanjäljen arvioitu pieneneminen sekä energiatehokkuuden parantumisen myötä saavutettava pienempi käytönaikainen

energiankulutus. Pieni vaikutus on myös energiatehokkaiden rakennusten rakentamiseen vaadittavalla suuremmalla rakennusmateriaalin määrällä, mikä kasvattaa rakennuksen elinkaaren alun hiilihiilipäästöjä. (Säynäjoki, Heinonen & Junnila 2012, 6–7.)

3.5.1 Betonirakenteiden hiilijalanjälki

Betoni on maailmanlaajuisesti tarkasteluna käytetyin rakennusmateriaali, jota valmistetaan vuosittain noin 13 miljardia kuutiota. Betonin pääraaka-aineina ovat vesi, sementti ja kiviaines, lisäksi betoniin lisätään käyttökohteesta riippuen lisäaineina mm. notkistimia ja huokostimia, joilla voidaan vaikuttaa betonimassan työstettävyyteen, tiivistyvyyteen ja pakkasenkestoon. Yleisiä betonin käyttökohteita talonrakentamisessa ovat esimerkiksi perustukset ja muut kantavat runkorakenteet ja infrarakentamisessa mm. sillat, padot ja tukimuurit. Betonin käytön suosioon rakennusmateriaalina vaikuttaa betonin edullisuus ja saatavuus yhdessä betonin monipuolisten ominaisuuksien kanssa, joista tunnetuimpia lienee betonin rakenteellinen lujuus ja jäykkyys. (Betoni rakennusmateriaalina 2022.)

Lujuusominaisuuksista betonin suurin etu on sen puristuslujuudessa, yleisimmin käytetyn betonilaadun puristuslujuus vaihtelee betonin käyttökohteesta riippuen välillä 30–80 MPa. Myös merkittävästi lujempia betonilaatuja voidaan valmistaa, saatavilla on esimerkiksi 60–100 MPa:n korkealujuusbetonia sekä erikoislujuutta kuitubetonia (lujuus 150–250 MPa), jota voidaan käyttää mm. sillanrakentamisessa tai teräs- ja jännebetonirakenteiden korjaamisessa. Vetolujuutta betonilla on puristuslujuuteen verrattuna huomattavasti vähemmän, tyypillisesti vain noin 10 % puristuslujuudesta. Vähäistä vetolujuutta parannetaan betoniterästyksellä, jolloin rakenteesta tulee teräsbetonia. (Mts.)

Yhtenä betonin etuna on myös sen kosteudenkesto, betoni on tiivistä ja kestää hyvin kosteutta. Betonin valmistuksessa vesi toimii kovettumisreaktion käynnistävänä tekijänä; kovettumisreaktiossa vesi ja sementti muodostavat yhdessä betonin pääraaka-aineet sitovaa sementtikiveä. Tiiveyden ja kosteudenkeston vuoksi betonia voidaan käyttää myös erikoisrakenteissa, kuten allasrakenteissa, pumppaamoissa ja padoissa. (Mts.) Kosteusvaurion yhteydessä betoni ei puolestaan ole edullinen mikrobien kasvualusta, johtuen erityisesti uuden betonin korkeasta pH:sta (Raken-

nuksen kosteus- ja sisäilmatekninen kuntotutkimus 2016, 133). Muita erityisesti mainittavia betonin edullisia ominaisuuksia ovat myös mm. palonkesto, ääneneristävyys ja muokattavuus (Betoni rakennusmateriaalina 2022).

Betonin suuri suosio rakennusmateriaalina tuo haasteita ilmastomuutoksen hidastamiseen, sillä betonin yhtenä pääraaka-aineena käytettävän sementin valmistuksesta aiheutuu merkittäviä määriä kasvihuonekaasupäästöjä. Sementin osuuden Suomen betoniteollisuuden kasvihuonekaasupäästöistä on arvioitu vaihtelevan välillä 70–90 % (Raivio, Laine, Klimscheffskij, Lehtomäki, Heino, Jonsson, Pokela & Ahlfors 2020, 22). Globaalisti tarkasteltuna on arvioitu, että sementin valmistus voi muodostaa jopa 8 % maailman kokonaispäästöistä, Suomessa päästöjen osuudeksi maan kokonaispäästöistä on arvioitu selvästi vähemmäksi; alle 2 % (mts. 17). Sementin suurimpia tuottajamaita vuonna 2021 olivat Kiina ja Intia; Kiinan osuus maailman sementtituotannosta oli 55 % ja Intian 8 %. Sementin tuotannon määrän odotetaan laskevan vähitellen Kiinassa mutta toisaalta kehittyvien Aasian ja Afrikan maiden tuotantomäärät tulevat kasvamaan, minkä arvioidaan nostavan sementin maailmanlaajuisia kokonaistuotantomääriä. (Cement 2022.)

Rakennussementin valmistuksessa tarvittavan raakajauheen pääraaka-aineena on kalkkikiven kalsiumkarbonaatti CaCO_3 , jota saadaan kallioperästä louhimalla. Kalsiumkarbonaatin lisäksi sementin raakajauheeseen lisätään oksideja; piioksidia (SiO_2), rautaoksidia (Fe_2O_3) sekä alumiinioksidia (Al_2O_3). Kalsiumkarbonaatin ja oksidien suhdetta säädetään kiviaineisten koostumuksesta riippuen, jonka jälkeen raakajauhe jauhetaan. Jauhamisen jälkeen raakajauheesta valmistetaan sementtiklinkkeriä polttamalla raakajauhetta kiertoilmauunissa reilussa $1400\text{ }^\circ\text{C}$. Polttovaiheessa kalsiumkarbonaatti kalsinoituu kalsiumoksidiksi (CaO) ja kalsiumoksidi sekä raakajauheen muut oksidit sintraantuvat yhdessä sementtiklinkkeriksi. Kalsinoitumisessa kalsiumkarbonaatista vapautuu hiilidioksidia. Käyttövalmista rakennussementtiä valmistuu lopulta kuulamyllyjauhatusessa, kun sementtiklinkkeriin sekoitetaan kipsiä sekä seosaineita. (Sementin valmistus 2022.)

Sementin tuotannossa kasvihuonekaasupäästöjä aiheutuu pääasiassa sementtiklinkkerin valmistusvaiheessa polttoprosessiin vaadittavan lämmön tuotannossa (energiantuotuksessa) ja kalsiumkarbonaatin kalsinoitumisessa. Polttoprosessin energiantuotuksen päästöt riippuvat energiantuotantoon käytettyjen polttoaineiden ominaishiilidioksidipäästöistä. Suurin osa Suomessa valmistetun sementin polttoprosessin energiantarpeesta tuotetaan ns. neitseellisillä fossiilisilla

polttoaineilla: kivihiilellä ja petrokoksilla, mutta kierrätyspolttoaineiden, kuten kierrätysöljyn ja pakkausmateriaalijätteen osuus on kuitenkin kasvanut yli 40 prosenttiin ja kierrätyspolttoaineiden määrää tullaan tulevaisuudessa nostamaan entisestään. (Ympäristöraportti 2022, 11–12.) Kalsinoinnista aiheutuvat hiilidioksidipäästöt ovat polttoaineenkulutukseen verrattuna kuitenkin merkittävästi suuremmat; Raivion ym. (2020, 18) arvion mukaan kalsinoinnin päästöt muodostavat noin 60 % sementin valmistuksen hiilidioksidipäästöistä Suomessa. Ilmastonmuutoksen ehkäisyn kannalta sementin käyttäminen betonin sideaineena onkin ongelmallista koska sementtiklinkkeriä ei voida valmistaa ilman kalsinointia (Ympäristöraportti 2022, 11).

3.5.2 Teräksen hiilijalanjälki

Teräs on betonin tavoin paljon käytetty rakennusmateriaali, jonka tuotannossa muodostuu merkittäviä määriä kasvihuonekaasupäästöjä. Kansainvälisen rauta- ja terästeollisuuden kauppayhdistyksen (World Steel Association) mukaan maailman raakateräksen tuotantomäärät ovat vuosikymmenien aikavälillä tarkasteltuna pääsääntöisesti kasvaneet, tuotantomäärien kasvu on ollut nopeinta 2000-luvun alusta nykypäivää ja viimeisen 70 vuoden aikana teräksen tuotantomäärä on yli kymmenkertaistunut. Vuonna 2021 terästä tuotettiin maailmanlaajuisesti yhteensä 1951 miljoonaa tonnia ja kolme suurinta raakateräksen tuottajamaata olivat Kiina, Intia ja Japani. Edellä mainituista maista Kiina on selvästi suurin teräksen tuottajamaa, vuonna 2021 Kiina tuotti lähes 53 % koko maailman raakateräksestä, toiseksi suurimman tuottajamaan Intian tuottaessa vain 6 %. (World Steel in Figures 2022.)

Teräksen etuna on ennen kaikkea sen korkea lujuus suhteessa painoon. Tästä johtuen teräksellä voidaan toteuttaa esimerkiksi betoniin verrattuna kevyempiä ja poikkileikkausmitoiltaan pienempiä mutta lujia rakenteita. Teräksen muita etuja ovat mm. palonkesto ja kulutuksenkestävyys sekä hitsattavuus, joka helpottaa kiinnitysten ja liitosten toteuttamista. Teräksen huonoja puolia ovat sen korkea hinta, lämpölaajeneminen sekä korroosio-ongelmat. Myös pienet poikkileikkausmitat mahdollistavasta teräksen korkeasta lujuus-paino-suhteesta voi aiheutua ongelmia; hoikkien rakenteiden toteutuksessa tulee kiinnittää erityistä huomiota rakenteen stabiiliuteen. (Teräs – perustietoa arkkitehtiopiskelijalle 2007, 28.) Teräksen pääraaka-aineita ovat rautamalmi ja hiili, lisäksi tavoiteltavista ominaisuuksista riippuen mukaan lisätään seosaineita, kuten esimerkiksi mangaania, alumiinia ja vanadiinia. Ruostumattomassa teräksessä seosaineina käytetään kromia ja

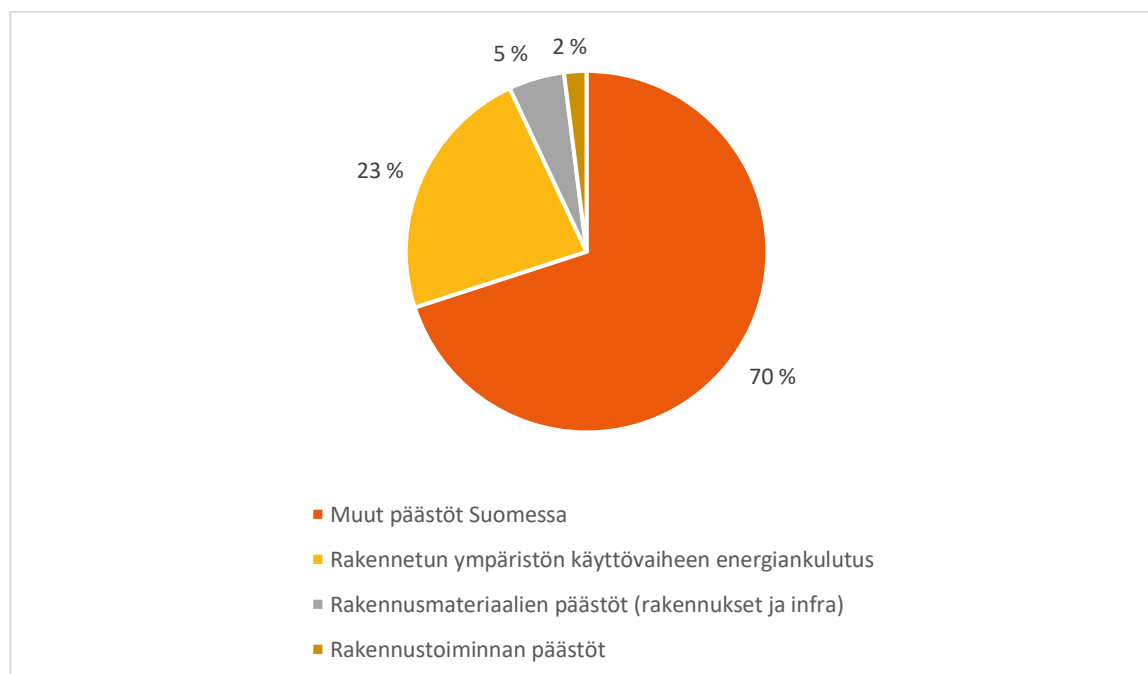
nikkeliä. Valuraudan ja teräksen pääasiallisena erona on niiden hiilipitoisuus; teräksen hiilipitoisuus on alle 1,7 % ja valuraudan hiilipitoisuus yli 1,7 %. Terästä voidaan valmistaa kallioperästä louhitusta rautamalmista tai kierrätysteräksestä. Rautamalmista valmistettaessa malmista rikastettu rautaoksidi pelkistetään ensin hiilen avulla masuunissa ja tämän jälkeen raakaraudasta tehdään raakaterästä mellottamalla sitä konvertterissa eli poistamalla raakaraudasta ylimääräinen hiili hapen avulla. Ennen valamista raakateräkselle tehdään vielä yleensä senkkakäsittelyjä, joissa siihen voidaan esimerkiksi lisätä seosaineita. Kierrätysteräksestä valmistettaessa valmistusprosessi on yksinkertaisempi; kierrätysteräs sulatetaan ja jalostetaan valokaariuunissa ja lopuksi tehdään tarvittavat senkkakäsittelyt. (Teräskirja 2022, 4–11.)

Raivion ym. (2020, 29) mukaan rautamalmista valmistetun teräksen kasvihuonekaasupäästöt terästonnia kohden ovat merkittävästi suuremmat kuin kierrätysmetallista valmistetulla teräksellä; rautamalmista valmistettaessa päästöjä aiheutuu noin 1800 kgCO₂e/t ja kierrätysteräksestä valmistettaessa noin 500 kgCO₂e/t. Rautamalmivalmistuksessa suurimmat päästöt aiheutuvat rautaoksidin pelkistyksessä, jossa rautaoksidin pelkistyessä hiili ja happi reagoivat keskenään muodostaen lopputuotteenaan hiilidioksidia. Pelkistysreaktioiden on arvioitu aiheuttavan enimmillään noin 95 % malmivalmistuksen kokonaispäästöistä. Kierrätysteräkseen pohjautuvassa teräksen valmistuksessa valmistusprosessissa ei ole mukana pelkistysvaihetta ja kasvihuonekaasupäästöjen suuruuteen vaikuttaa ensisijaisesti valokaariuunissa käytetyn sähkön päästöt. (Mts. 28–29.)

3.6 Polttoaineet ja käyttövaiheen hiilijalanjälki

Yhteisenä merkittävimmän rakennuksen elinkaaren eri vaiheiden hiilijalanjäljen suuruuteen vaikuttavana tekijänä on polttoaineiden kulutus. Polttoaineita poltetaan energian tuottamiseksi rakennuksen koko elinkaaren ajan rakennustuotteiden raaka-aineiden hankkimisesta alkaen, päättyen rakennuksen purkamiseen ja jätteenkäsittelyyn. Esimerkiksi tuotevaiheessa polttoainetta käytetään raaka-aineesta riippuen louhimiseen, kuljetuksiin ja tuotteen valmistusprosessiin. Käyttövaiheessa polttoainetta kuluu puolestaan erityisesti rakennuksen lämmittämiseen ja purkuvaiheessa jälleen materiaalien käsittelyyn: purkamiseen, kuljetuksiin ja jätteenkäsittelyyn. Suurin osa rakennuksen elinkaaren polttoaineenkulutuksesta menee kuitenkin rakennuksen energiantuotantoon, pääasiassa käytönaikaiseen lämmittämiseen. Rakennusten energiankulutuksen päästöt näkyvät myös laajemmassa mittakaavassa, kun tarkastellaan maakohtaisten kasvihuonekaasupäästöjen ko-

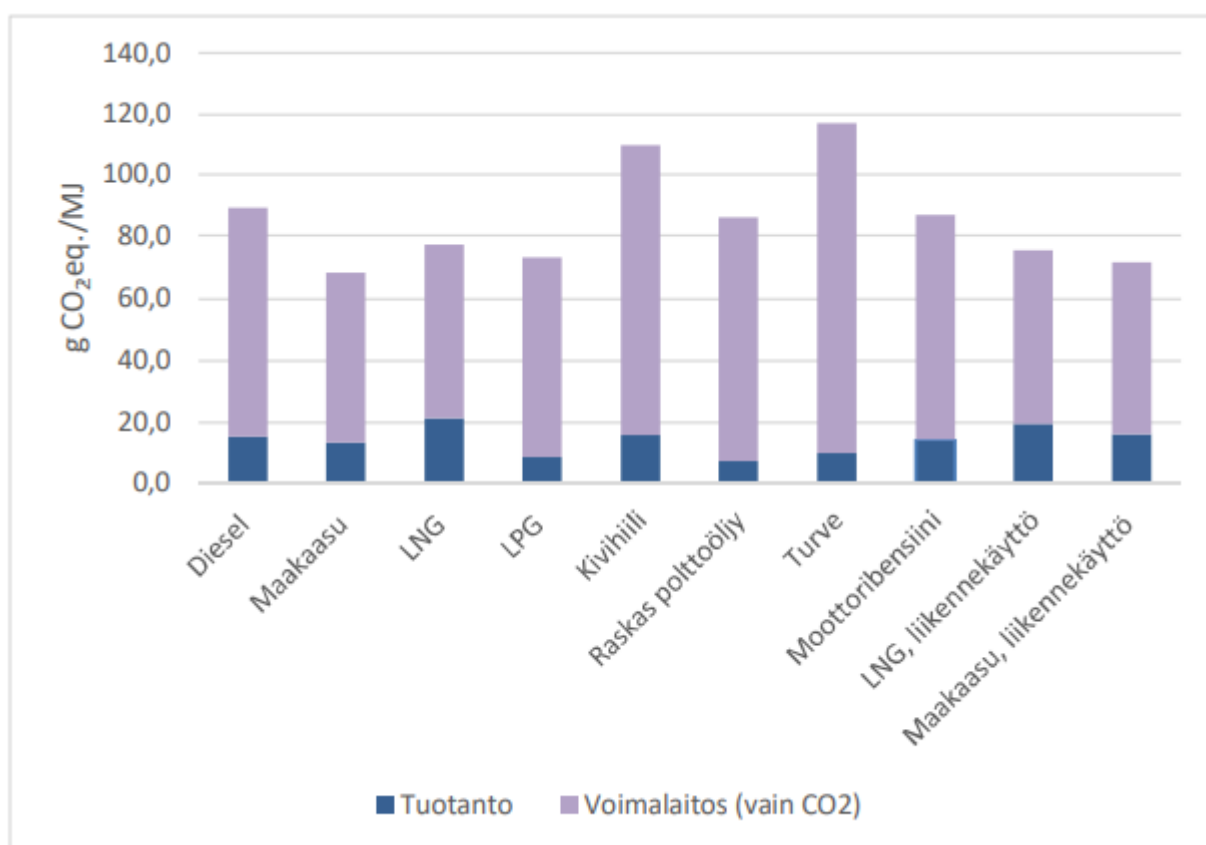
konaismääriä. Kuviossa 9 esitetyn mukaisesti rakennetun ympäristön käyttövaiheen energiankulutuksen on arvioitu aiheuttaneen jopa 23 % Suomen vuoden 2018 kasvihuonekaasupäästöjen kokonaismäärästä (Vähähiilinen rakennusteollisuus 2035, 9).



Kuvio 9. Rakennetun ympäristön elinkaaren päästöjen suhteellinen osuus Suomen vuoden 2018 kokonaispäästöistä (Vähähiilinen rakennusteollisuus 2035, 9).

Merkittävä osa polttoaineiden hiilidioksidipäästöistä aiheutuu polttoprosessista mutta päästöjä muodostuu myös polttoaineiden tuotantovaiheessa, jossa polttoaine muokataan hyödynnettävään muotoon. Tuotantovaiheessa päästöjä voi muodostua polttoaineesta riippuen monessa eri vaiheessa, esimerkiksi rakennusten erillislämmitykseen käytettävän kevyen polttoöljyn päästöjä aiheuttavia tuotannon vaiheita ovat: tuotanto ja käsittely, kuljetukset, öljynjalostus sekä käsittely ja jakelu. Kaukolämmön yhtenä energialähteenä toimivan kivihiilen tuotannon päästöjä aiheuttavia vaiheita on puolestaan vähemmän, vaiheita ovat pääasiassa: tuotanto- ja käsittelyvaihe sekä kuljetukset. Polttoaineen tuotannon vaiheiden lukumäärä ei kuitenkaan korreloi suoraan tuotantovaiheen päästöjen suuruuteen, esimerkiksi edellä mainittujen kevyen polttoöljyn ja kivihiilen tuotantovaiheen päästöt ovat samaa suuruusluokkaa, noin 16 gCO₂e/MJ. (Sokka, Correia, Koljonen 2018.)

Lämmityspolttoaineiden kokonaispäästöjä tarkastellessa merkittävin päästöihin vaikuttava tekijä on polttoaineen polttoprosessista aiheutuvat päästöt. Esimerkiksi Sokan ym. (2018, 38) mukaan tuotantovaiheessa suurimmat päästöt aiheutuvat kivihiilen ja nesteytetyn maakaasun tuotannosta ja vastaavasti vähäpäästöisimpiä ovat turpeen ja nestekaasun tuottaminen. Kun tarkastellaan kokonaispäästöjä ja mukaan huomioidaan polttoaineiden polttoprosessissa muodostuvat päästöt, tilanne muuttuu päinvastaiseksi. Turpeen polttoprosessille on määritetty lämmityspolttoaineista korkein päästökerroin, mistä johtuen turve nousee kokonaispäästöiltään saastuttavimmaksi polttoaineeksi. (Mts. 37–38.) Polttoprosessin päästöjen vaikutus polttoaineiden kokonaispäästöihin ilmenee kuviosta 10, jossa esitetään eri polttoaineiden tuotannon ja polton päästöjä polttoaineiden kokonaispäästöihin suhteutettuna. Sokan, Correian ja Koljosen (2018) tutkimuksessa käytetyt päästökertoimet ovat Tilastokeskuksen määrittämiä kertoimia vuodelta 2018. Tilastokeskuksen vuodelle 2022 määrittämissä lämmityspolttoaineiden päästökertoimissa turve on edelleen saastuttavimmasta päästä (Polttoaineluokitus 2022).



Kuvio 10. Polttoaineiden kokonaispäästöjen jakautuminen tuotannon ja polton päästöihin (Sokka ym. 2018, 38).

Suomen ilmasto- ja energiastrategian polttoaineisiin liittyvien linjausten ja päätösten myötä polttoaineiden kasvihuonekaasupäästöjen arvioidaan pienenevän tulevaisuudessa, mikä tulee osaltaan vaikuttamaan myös rakennusten elinkaaren päästöihin. Keskeisimmät ilmasto- ja energiastrategian linjaukset liittyvät vihreän siirtymän edistämiseen ja venäläisestä fossiiliperäisestä energiasta luopumiseen. Strategiassa linjataan mm., että 2020-luvulla uusiutuvan energian käytön osuus tulee olla yli 50 %. Tavoitteen saavuttamiseksi on linjattu esimerkiksi uusiutuvan energian hankkeille ja energiatehokkuushankkeille myönnettävistä energiatuista, tuulivoiman rakentamisen edistämisestä sekä kevyen polttoöljyn jakeluvetoisuuden nostamisesta 30 prosenttiin 2020-luvulla. Venäläisen fossiilisen energian kuten öljyn ja kivihiilen käytöstä irtautumiseksi strategiassa esitetään mm. energiainvestointien nopeuttamista. (Hiilineutraali Suomi 2035 2022.) Kivihiilen energiakäytöstä luopumisesta päätettiin jo vuonna 2019, jolloin säädettiin laki hiilen energiakäytön kieltämisestä. Lain mukaan kivihiilen, antrasiitin, ruskohiilen, hiilibrikettien, koksen ja puolikoksen käyttö on kielletty 1. toukokuuta 2029 alkaen. Kiellosta voidaan poiketa lupamenettelyllä sähkön ja lämmön huoltovarmuuden turvaamiseksi poikkeusolojen vallitessa. (L 416/2019.) Tällä hetkellä kivihiiltä käytetään Suomessa vielä mm. rakennusten kaukolämmön tuotannossa (Sokka, Correia, Koljonen 2018, 39).

4 Rakentamisen päästövähennyskeinoja

4.1 Rakennusmateriaalien päästöjen pienentäminen

4.1.1 Betonin päästövähennyskeinoja

Betonin kasvihuonekaasupäästöjen vähentämisen keskiössä on sementin valmistusprosessin päästöjen pienentäminen, sillä esimerkiksi Suomessa sementin päästöt muodostavat 70–90 % betonirakenteiden päästöistä (Raivio ym. 2020, 20). Sementissä valtaosa päästöistä aiheutuu sementtiklinkkerin valmistuksessa klinkkerin kalsinointi- ja polttoprosesseissa ja näin ollen klinkkerin korvaaminen vaihtoehtoisilla vähäpäästöisemmällä raaka-aineilla, kuten lentotuhkalla tai masuunikuonalla on yksi keino vähentää sementin päästöjä. Sementtiteollisuudessa klinkkerin korvaaminen vähäpäästöisemmällä raaka-aineilla onkin jo tunnistettu potentiaalisena päästövähennyskeinona, esimerkiksi Suomessa sementtiä valmistavan Finnsementin myydyimmässä sementissä, Oiva-sementissä, klinkkeriä korvaavia seosaineita: kalkkikiveä ja masuunikuonaa, on käytetty 21–35 %. Oiva-sementti on sementtilaadultaan CEM II -tyypin sementtiä ja sitä markkinoidaan ympäristöystävällisempänä sementtivaihtoehtona. (Oiva-sementti 2022.)

Sementtiteollisuuden kasvihuonekaasupäästöjen vähentämiseksi on kehitetty myös merkittävästi vähemmän klinkkeriä sisältäviä sementtilaatuja nk. masuunikuonasementtejä (kolmossementtejä). Euroopassa valmistettavissa CEM III -tyypin kolmossementeissä klinkkerin osuus voi vaihdella tuotteesta riippuen välillä 5–64 % masuunikuonan osuuden ollessa 36–95 %. Finnsementin kolmossementissä klinkkerin osuus on SFS-standardin (SFS EN 197-1) vaatimusten mukaisesti välillä 35–64 %. Mattilan (2022) mukaan Suomessa valmistettavan kolmossementin hiilidioksidipäästöt ovat näin ollen noin 25 % pienemmät kuin yleisesti käytetyllä CEM II -tyypin sementillä ja noin 40 % pienemmät kuin CEM I -tyypin. Leveelahti (2022, 75) yhtyy kirjoituksessaan Mattilan esittämiin näemyksiin kolmossementin pienemmistä hiilidioksidipäästöistä ja esittää lisäksi, että kolmossementti kuormittaa ympäristöä vähemmän myös siksi, että kolmossementtiä käytettäessä betonin valmistamisessa tarvitaan vähemmän vettä ja sementtiä.

Vaikka kolmossementti on ympäristön kannalta parempi vaihtoehto, sen ominaisuudet aiheuttavat kuitenkin myös haasteita käytön laajentamiselle. Punkin (2021, 78) mukaan rakennuskustannusten näkökulmasta kolmossementin lujuudenkehitys on muihin sementtilaatuihin verraten hitaampaa, mikä pidentää aikatauluja ja voi siten lisätä kustannuksia. Masuunikuonan muodostaessa noin 70 % betonin sideaineesta haasteita tulee myös betonin säilyvyyteen, esimerkiksi betonin karbonatisoituminen nopeutuu, mikä nopeuttaa puolestaan betoniterästen korroosiota. Korkea masuunikuonan osuus heikentää myös betonin pakkassuolakestävyyttä, mikä rajoittaa nk. kuonabetonin käyttökohteita: esimerkiksi pakkassuolarasitetuissa rakenteissa, kuten silloissa ja parkkihalleissa käytetty betoni, saa sisältää masuunikuonaa enintään 50 %. (Mts. 78.)

Teollisuuden sivuvirtojen hyödyntäminen mm. sementin valmistuksessa ei ole itsessään kovinkaan uusi päästövähennyskeino ja kysyntä erityisesti teollisuuden tuottamalle masuunikuonalle on suurta, Suomessa masuunikuona on jo lähes täysin hyödynnetty ja Euroopankin tasolla kuonasta hyödynnetään tällä hetkellä noin 80 %. Sementtiklinkkerin korvaamisessa masuunikuonalla voikin esiintyä tulevaisuudessa ongelmia masuunikuonan kasvavan kysynnän vuoksi koska masuunikuonaa käytetään paljon myös maanparannuksessa sekä maa- ja tierakentamisessa. (Raivio ym. 2020, 18.) Maanparantamisessa kuonaa käytetään maaperän pH:n nostamiseen, maaperän lannoittamiseen ja kuohkeuttamiseen. Maa- ja tierakentamisessa kuonaa käytetään puolestaan pilaantuneiden maa-ainesten neutralointiin sekä asfaltin runkoaineena (Maarakentamisen uusiomateriaalit 2011, 79). Edellä mainitut seikat ja sementin valmistuksen aiheuttamat päästöt

huomioiden masuunikuonan käyttöä voi olla tarpeen ohjata tarkoituksenmukaisesti maa- ja tierakentamisesta ja lannoituskäytöstä nimenomaan sementin valmistukseen (Raivio ym. 2020, 18). Myös vähäpäästöisten valmistustekniikoiden kehittyminen masuunikuonaa sivutuotteenaan tuotavissa teollisuuksissa, kuten terästeollisuudessa, voi johtaa masuunikuonan saatavuusongelmiin; terästeollisuus on siirtymässä teräksen raaka-aineiden pelkistyksessä perinteisestä masuunissa tehtävästä pelkistyksestä yhä enemmän vetypelkistykseen, mikä vähentää saatavilla olevan masuunikuonan määrää (Punkki 2021, 78).

Toinen sementin valmistukseen liittyvä päästövähennyskeino, jolla vaikutetaan myös betonirakenteiden päästöihin, on uusiutuvien polttoaineiden sekä kierrätyspolttoaineiden käytön lisääminen sementin polttoprosessin energianlähteenä. Kierrätyspolttoaineeksi soveltuu mm. kierrätysöljy sekä kaupan ja teollisuuden pakkausmateriaaleista valmistettu SRF-polttoaine (engl. Solid Recovery Fuel). Suurin osa sementin polttoprosessissa käytettävistä polttoaineista on vielä fossiilisia polttoaineita, kuten öljykoksia ja kivihiiltä, mutta uusiutuvien polttoaineiden ja kierrätyspolttoaineiden käyttö on jo melko yleistä; Suomessa valmistettavan sementin polttoprosessin lämmöstä noin 40 % tuotetaan edellä mainituilla polttoaineilla. (Raivio ym. 2020, 18.) Uusiutuvien polttoaineiden ja kierrätyspolttoaineiden määrää voidaan kuitenkin edelleen kasvattaa, esimerkiksi Finnsementin Lappeenrannan tehtaan investointien myötä kierrätyspolttoaineiden osuus voidaan kasvattaa 80 prosenttiin vuodesta 2023 alkaen (Leveelahti 2022, 78).

Betonin hiilidioksidipäästöjen vähentämiseen voidaan pyrkiä myös sementin valmistuksessa kalsiumkarbonaatin kalsinoinnissa muodostuvan hiilidioksidin talteenotolla ja hyötykäytöllä. Hiilidioksidin talteenottoa ei vielä toistaiseksi ole otettu maailmalla käyttöön laajassa mittakaavassa, mutta tekniikan testausta ja arviointia toteutetaan jo useissa suuren mittakaavan projekteissa ympäri maailmaa. Alustavien tutkimustulosten mukaan nykytekniikalla voitaisiin ottaa talteen jopa 90 % kalsinoinnin hiilidioksidipäästöistä.

Hiilidioksidin talteenotto ja hyötykäyttö sisältää eri vaiheita, joita ovat: hiilidioksidin rikastaminen ja talteenotto sekä hyötykäyttö ja varastointi. Sementtiteollisuudessa testattavana olevia rikastamismenetelmiä ovat tällä hetkellä mm. ”Carbonate looping” ja Oxyfuel combustion”. Carbonate looping -menetelmässä kalsiumoksidi altistetaan hiilidioksidipitoiseen palamiskaasuun ja tämän

seurauksena muodostuu kalsiumkarbonaattia. Oxyfuel combustion -menetelmässä polttoprosessissa käytetään puhdasta happea ja tämän myötä prosessissa muodostuu talteen otettavaa hiilidioksidia. Talteen otettua hiilidioksidia voidaan hyödyntää mm. polttoaineiden ja kemikaalien valmistamisessa tai biomassan tuotannossa. Hyödyntämisen haasteena ovat kuitenkin tällä hetkellä mm. talteenottotekniikan korkeat investointikustannukset sekä talteenotossa muodostuvan hiilidioksidin valtava määrä, mistä johtuen hyödyntämisen sijaan hiilidioksidia jouduttaisiin varastomaan pääosin kallioperään. (The role of cement in the 2050 low carbon economy 2013, 43–46.)

Betonin sisältämä sementtiklinkkeri voi suurista valmistuksen aikaisista kasvihuonekaasupäästöistään huolimatta vaikuttaa ilmaston kannalta osin myös positiivisesti. Sementtiklinkkerin positiivinen ilmastovaikutus aiheutuu betonin karbonatisoitumisesta. Betonin karbonatisoitumisessa betonipinnan kalsiumhydroksidi reagoi ilman hiilidioksidin ja veden kanssa, minkä seurauksena kalsiumhydroksidi muuttuu kalsiumkarbonaatiksi ja betonin pH alenee. Betonirakenteiden karbonatisoituminen on rakenteellisesti tarkasteltuna lähtökohtaisesti negatiivinen ilmiö, sillä betonin pH:n alentuessa betonin alkalisuus ei enää suojaa betonirauotteita korroosiolta ja johtaa vähitellen rakenteellisiin vaurioihin. Vauriot ilmenevät tyypillisesti betonin halkeamina ja lohkeiluna rauotteiden ympäristössä. (Betonin vaurioituminen 2022.) Ilmaston näkökulmasta betonin karbonatisoituminen on kuitenkin toisaalta myös positiivinen ilmiö, sillä kalsiumhydroksidin, hiilidioksidin ja veden välisessä kemiallisessa reaktiossa betoniin sitoutuu ilman hiilidioksidia ja betonirakenne toimii näin ollen hiilinieluna. Karbonatisoitumisen myötä rakennuskannan on arvioitu kykenevän sitomaan 15–20 % sementin valmistuksen kalsinointivaiheen päästöistä, purkuvaiheessa hienojakeiseksi murskattu betoni voi sitoa kalsinoinnin päästöjä jopa 80 %. (Raivio ym. 2020, 27.) Betonin karbonatisoitumisnopeuteen vaikuttaa käytetyn betonin laatu, erityisesti betonin tiiviyyteen vaikuttava vesi-sementtisuhde ja kalsiumhydroksidin määrä, sekä betonin kosteusrasitus; kastuneessa betonirakenteessa betonihuokoset ovat kyllästyneet vedellä, mikä estää ilman hiilidioksidin tunkeutumista syvemmälle rakenteeseen. Ilmiönä betonin karbonatisoituminen on hidasta, karbonatisoituminen alkaa betonin pinnasta ja 50 vuoden jälkeen etenemä voi olla noin 30 mm betonilaa- dusta ja rasitusluokasta riippuen. (Vares, Häkkinen & Vainio 2017, 39–40.)

4.1.2 Teräsrakenteiden päästövähennyskeinoja

Teräksen valmistuksessa hiilidioksidipäästöjä aiheutuu erityisesti masuunissa tehtävässä rautaoksidin pelkistyksessä, jossa hiilen ja hapen välisen reaktion lopputuotteena syntyy hiilidioksidia. Rautamalmiin pohjautuvassa teräksen valmistuksessa pelkistyksestä aiheutuva hiilijalanjälki voi olla jopa yli 1800 kgCO₂e/t ja prosentuaalisesti tarkasteltuna pelkistys voi muodostaa 85–95 % teräksen valmistuksen hiilidioksidin kokonaispäästömäärästä. Edellä mainituista seikoista johtuen malmipohjaisen teräksen valmistuksen tehokkaana päästövähennyskeinona on pelkistystekniikan kehittäminen vähäpäästöisemmäksi. Hiilipelkistyksen rinnalle onkin jo kehitetty vähäpäästöisempi vaihtoehto: vetypelkistys. Vetypelkistyksessä rautaoksidi pelkistetään hiilen sijaan vedyllä, jolloin pelkistysreaktiossa rautaoksidi ja vety reagoivat keskenään ja lopputuotteena syntyy raakaraudan lisäksi vettä. Vetypelkistyksellä vältetään kokonaan hiilidioksidin muodostuminen pelkistysreaktion aikana. Tästä huolimatta vetypelkistyskään ei ole kuitenkaan täysin päästötöntä, sillä pelkistykseen tarvittavan vedyn tuottaminen vaatii paljon sähköä. Tämän lisäksi raakaraudan sulattaminen vaatii edelleen myös merkittäviä määriä energiaa. Vetypelkistyksen yhtenä ongelmana on myös mm. vedyn varastointi; vedyn tiheys on todella pieni, mistä johtuen vety täytyy varastoida korkeapainesäiliöissä. (Raivio ym. 2020, 29.)

Rautamalmipohjaisen valmistuksen lisäksi terästä valmistetaan kierrätysteräksestä. Kierrätysteräkseseen pohjautuvan teräksen valmistuksen etuna on malmipohjaista valmistusta merkittävästi pienempi energiankulutus, kierrätysteräksestä valmistettaessa teräksen valmistukseen kuluu arviolta vain viidesosa malmipohjaisen valmistuksen energiankulutuksesta. Valmistusprosessissa on myös vähemmän päästöjä tuottavia valmistusvaiheita, sillä valmistusvaiheista jää pois paljon hiilidioksidia tuottava rautaoksidin pelkistysvaihe. Vaikka kierrätysteräspohjainen valmistustapa on jo lähtökohtaisesti vähäpäästöisempää kuin malmipohjainen valmistustapa, voidaan valmistustavan päästöjä edelleen myös vähentää. Valmistustavan suurin säästöpotentiaali on valokaariuunissa tehtävässä kierrätysteräksen sulatusvaiheessa, sillä valokaariuuni kuluttaa paljon sähköä ja valmistustekniikan päästöt ovat siten vahvasti riippuvaisia valokaariuunin sähköntuotantotavasta; mitä vähäpäästöisempää sähköä uunissa käytetään, sitä pienempi on valmistetun teräksen hiilijalanjälki. (Mts. 31.)

Kierrätysteräspohjainen valmistustapa on maailmanlaajuisesti vähitellen yleistymässä, esimerkiksi vuonna 2020 neljännes maailmalla tuotetusta teräksestä valmistettiin kierrätysteräksestä. Valmistustavan yleistymistä tukee maailmanlaajuiset päästövähennystavoitteet sekä mm. kyky kierrättää terästä tehokkaasti; tällä hetkellä kierrätetään noin 80 % maailman teräksestä (mts. 31). Toisaalta korkealla kierrätysasteella on myös kääntöpuolensa, sillä se ilmaisee myös sitä, että kierrätysterästä ei ole saatavilla lisää enää kovinkaan paljoa. Kierrätysteräksen saatavuusongelma puolestaan rajoittaa suoraan kierrätysteräspohjaista teräksen valmistusta. Somersin (2022, 20) mukaan saatavuusongelman taustalla on pääasiassa kaksi tekijää: teräksen pitkä käyttöikä ja kierrätysteräksen laadun puutteet. Vaikka materiaalien pitkä käyttöikä on lähtökohtaisesti ilmaston kannalta positiivinen asia, hidastaa se kuitenkin kierrätyskelpoisen teräksen uudelleenkäyttöä. Käytännössä terästä tulee saataville vähitellen rakenteiden kuluessa vuosikymmenien aikana. EU:n tasolla on arvioitu, että EU:n talouden hidastumisen ja siten myös rakentamisen vähentymisen myötä saatavilla olevan kierrätysteräksen määrä tulisi vastaamaan teräksen kysyntää vuoteen 2050 mennessä. (Mts. 20.)

Kierrätysteräksen saatavuuteen vaikuttaa myös kierrätetyn materiaalin laadun vaihtelu. Kierrätysteräs (tai romumetalli) sisältää usein epäpuhtauksia, joita on haastavaa saada poistettua, ja jotka vaikuttavat teräksen laatuun. Kierrätysteräs ei tästä johtuen lähtökohtaisesti sovellu korkealaatuisten terästuotteiden valmistamiseen. Erityisen ongelmallista kierrätysteräksen hyödynnettävyyden kannalta on kuparijäämien esiintyminen; kuparijäämät aiheuttavat mm. pintavikoja ohutlevyterästuotteissa. Edellä mainitusta johtuen kuparijäämien enimmäisosuudeksi ohutlevyterästuotteissa suositellaan 0,1 painoprosenttia, ja pilareissa, palkeissa sekä muissa vastaavissa tuotteissa enintään 0,4 painoprosenttia. (Mts. 20.)

4.2 Suunnittelun valintojen vaikutus rakennuksen hiilijalanjälkeen

Suuri osa rakennuksen hiilijalanjälkeen vaikuttavista valinnoista tehdään rakennushankkeen alun selvitys- ja suunnitteluvaiheissa. Rakennushanke alkaa tavanomaisesti tarveselvitysvaiheella, jossa tarkastellaan hankkeen tarpeellisuutta; uudisrakennuksen osalla mm. tilahankinnan perusteluja ja korjausrakentamisessa tilamuutos- tai korjaustarpeita. Lisäksi tarkastellaan eri toteuttamisvaihtoehtoja, ja onko rakennushankkeen toteuttamiseen olemassa ylipäänsä edellytyksiä. Rakennuksen hiilijalanjälkeen vaikuttavia valintoja tehdään jo tarveselvitysvaiheessa, kun määritetään tilantar-

peita, vaihtoehtoisia rakennuspaikkoja sekä laatu-, kustannus ja aikataulutavoitteita. Tarveselvityksen jälkeen tehdään hankepäätös ja lähdetään tarkentamaan rakennushanketta hankesuunnittelu- vaiheella ja myöhemmin konkreettisella suunnittelulla, joka sisältää ehdotus-, yleis- ja toteutus- suunnittelun. (RT 10-11284 2017.)

4.2.1 Rakennuspaikan vaikutus rakennuksen hiilijalanjälkeen

Hiilijalanjäljen näkökulmasta suunnittelun alkuvaiheessa tulisi kiinnittää huomiota rakennuspaikan valintaan, sillä rakennuspaikan ominaisuudet voivat vaikuttaa merkittävästi rakennuksen elinkaaren hiilijalanjälkeen. Rakennuspaikan valinnassa on suositeltavaa tarkastella maaperän ominaisuuksia, erityisesti maaperän kantokestävyyttä. Maaperän ominaisuudet ja tontin muodot voidaan selvittää maaperätutkimuksella, kairausten, maanäytteiden ja vaaitusten avulla. Maaperän kantokestävyys vaikuttaa rakennuksen perustamistapaan, sillä heikosti kantavalle maaperälle, kuten esimerkiksi savelle rakennettaessa rakennuksen perustusten mitoituksessa voidaan käyttää verrattain pieniä maaperän sallittuja pohjapaineita. Tästä johtuen perustamistapana ei välttämättä voida käyttää tyypillistä nauha-anturaperustusta, vaan perustamistavaksi valitaan vaihtoehtoisesti paalu-perustus ja/tai maaperää muokataan massanvaihdolla tai stabiloinnilla.

Erityisesti maaperän stabilointi voi nostaa merkittävästi rakennuksen elinkaaren hiilijalanjälkeä. Stabiloinnissa maan kantokestävyyttä parannetaan maaperään sekoitettavalla sideaineella. Stabilointia voi olla tarpeen tehdä erityisesti, mikäli rakentamiseen halutaan hyödyntää alun perin heikosti kantavia maa-alueita, esimerkiksi savi-, siltti- tai liejupohjaisia maa-alueita ja halutaan välttää suuria maamassojen vaihtoja. Stabiloinnilla maaperän kantokestävyyttä voidaan parantaa 10–100 kertaiseksi maaperän alkuperäiseen kantavuuteen verrattuna. Stabilointimenetelmiä on neljä erilaista: pilaristabilointi, massastabilointi, suihkuinjektointi ja kerrosstabilointi. Yleisimmin käytetty stabilointimenetelmä on pilaristabilointi, jossa maaperään tavoitesyvyydelle poratulla kairalla maa-aineksen sekaan syötetään sideainetta, jolla saadaan aikaan sylinterimäisiä kantavuutta parantavia pilareita. Pilari- ja massastabilointia käytetään erityisesti laajojen rakennusalueiden esivahvistamiseen, kerrosstabilointi on puolestaan tierakentamisessa käytetty menetelmä. Suihkuinjektointi on talonrakentamisessa, erityisesti korjausrakentamisessa käytetty stabilointimenetelmä, jossa maaperään porattujen tankojen päistä tulevalle korkeapainesuihkulla maaperään sekoitetaan suspensiota, joka samalla leikkaa ja syrjäyttää maa-ainesta muodostaen maaperään betoniliiriöitä. (Tietoa sementtistabiloinnista 2022.)

Ruuskan ja Häkkisen (2015, 327) asuinkerrostalon parametrinen tapaustutkimuksen mukaan stabilointi voi muodostaa noin 40 % rakennuksen koko elinkaaren tuotesidonnaisista päästöistä. Ruuskan ja Häkkisen tutkimuksessa tutkittiin kirjallisuuskatsauksella sekä parametrisella tapaustutkimuksella eri tekijöiden vaikutuksia rakennusten kasvihuonekaasupäästöihin. Maaperän stabiloinnista aiheutuva tuotesidonnaisten päästöjen kasvu näkyy myös rakennuksen tuotesidonnaisten ja energiankulutuksesta aiheutuvien käyttösidonnaisten päästöjen suhteellisissa osuuksissa rakennuksen elinkaaren kokonaispäästöistä: stabiloinnin myötä tuotesidonnaiset päästöt voivat muodostaa lähes 50 % elinkaaren kokonaispäästöistä (mts. 328). Vastaavia tutkimustuloksia stabiloinnin vaikutuksista rakennuksen hiilijalanjälkeen on saatu myös Ruuskan ja muiden vuonna 2013 julkaistussa tutkimuksessa, jossa selvitettiin rakennusmateriaalien kasvihuonekaasujen ympäristövaikutuksia rakennuksen elinkaaren aikana (Ruuska, Häkkinen, Vares, Korhonen, Myllymaa 2013). Tutkimus toteutettiin 6-kerroksisen A-energialuokan betonielementtikerrostalon parametrinen tapaustutkimuksena, jossa hiilijalanjäljen laskennalla arvioitiin rakennuksen materiaalien kasvihuonekaasupäästöjen vaihteluväliä. Tutkimuksen perusteella tontin stabiloinnin aiheuttamat kasvihuonekaasupäästöt voivat olla suuremmat kuin rakennusmateriaalien kokonaispäästöt 50 vuoden elinkaaren aikana, stabiloinnin päästöiksi arvioitiin enimmillään 1080 tnCO₂e ja uudis- ja korjausrakennusvaiheen materiaalipäästöjen summaksi 741–1619 tnCO₂e rakennuksen rakennetyypeistä riippuen. (Ruuska ym. 2013, 16; Ruuska & Häkkinen 2013, 85.)

Stabiloinnin suuri hiilijalanjälki johtuu siinä käytetystä sideaineesta, koska stabiloinnissa käytetään tyypillisesti sideaineena kalkki-sementtiseosta, suihkustabiloinnissa puolestaan vesi-sementtiseosta. Tulevaisuudessa stabiloinnin vaikutus rakennusten hiilijalanjäljessä voi korostua entisestään, sillä erityisesti pääkaupunkiseudun täydennysrakentamisessa hyödynnetään heikosti kantavia maa-alueita yhä enemmän. (Ruuska & Häkkinen 2015, 323.) Toisaalta samaan aikaan sementtiteollisuus kehittää pienemmän hiilijalanjäljen omaavia sementtilaatuja, masuunikuonasementtejä, mikä puolestaan voi pienentää stabiloinnin hiilijalanjälkeä (Raivio ym. 2020, 46).

4.2.2 Vähähiilisyysnäkökulma rakennuksen energiankulutuksen pienentämisessä

Suuri osa rakennuksen elinkaaren kasvihuonekaasupäästöistä aiheutuu rakennuksen käytön aikaisesta energiankulutuksesta (Röck ym. 2020, 6; Ruuska & Häkkinen 2015, 325). Näin ollen käytön aikaisesta energiankulutuksesta pienentävillä suunnitteluratkaisuilla voidaan vähentää merkittävästi myös rakennuksen elinkaaren hiilijalanjälkeä. Energiankulutuksesta aiheutuviin päästöihin vaikuttaa

pääasiassa kaksi tekijää: ostoenergian tuotannosta aiheutuvat päästöt ja rakennuksen energiatehokkuus. Ostoenergiaa käytetään rakennuksen käyttöluokasta ja talotekniikasta riippuen lämmitämiseen, jäähdyttämiseen sekä taloteknisten järjestelmien ja kuluttajalaitteiden käyttöön. Ostoenergian päästöt ovat riippuvaisia käytetyn energian, kuten kaukolämmön tai sähkön tuotannosta aiheutuvista päästöistä (Sokka ym. 2018, 38). Energiaa tuotetaan käytännössä fossiilisia sekä uusiutuvia polttoaineita polttamalla, uusiutuvalla energialla, kuten tuuli- ja vesivoimalla, sekä ydinvoimalla.

Rakennuksen ostoenergian määrään ja siten energiankulutuksen hiilijalanjälkeen voidaan vaikuttaa merkittävästi kiinnittämällä huomiota rakennuksen energiatehokkuuteen. Suomessa rakennusten energiatehokkuutta ohjataan maankäyttö- ja rakennuslailla, jossa rakennuksen energiatehokkuudelle esitetään vähimmäisvaatimuksia mm. rakennuksen käyttötarkoituksesta, pinta-alasta ja runkomateriaalista riippuen (A 1010/2017). Rakentamismääräyksissä energiatehokkuusvaatimuksia on osoitettu pääasiassa uudisrakennuksille, rakennusten korjaus- ja muutostyön sekä käyttötarkoituksen muutoksen yhteydessä energiatehokkuutta tulee parantaa, mikäli toimenpiteet edellyttävät rakennus- tai toimenpidelupaa. Luvanvaraisen korjaus- tai muutostyön yhteydessä energiatehokkuuden parantamisesta voidaan kuitenkin poiketa mm., mikäli rakennus on kokonaispinta-alaltaan enintään 50 m², rakennus on suojeltu tai energiatehokkuuden parantaminen haittaisi rakennuksen tarkoituksenmukaista käyttöä, esimerkiksi kasvihuoneiden käyttöä. (A 4/13.)

Rakennuksen energiatehokkuusvaatimusten toteutuminen voidaan osoittaa rakennuksen käyttötarkoituksesta riippumatta E-luvun avulla ja asuinrakennusten osalla myös rakenteellisella energiatehokkuudella. E-luku ilmaisee, kuinka paljon rakennus kuluttaa energiamuotokertoimilla painotettua ostoenergiaa vuoden aikana yhtä lämmitettyä nettoneliötä kohden [kWh_E/(m²a)].

Rakennusten eri käyttöluokille on asetettu E-luvun raja-arvot, joita rakennuksen laskennallinen E-luku ei saa ylittää. Rakennuksessa käytettyjen energiamuotojen vaikutus rakennuksen energiatehokkuuteen huomioidaan laskennallisessa ostoenergiankulutuksessa energiamuotokertoimien avulla, kertomalla eri energiamuotojen laskennalliset kulutukset energiamuotokertoimilla. Voimassa olevat energiamuotokertoimet ilmenevät taulukosta 1. (A 1010/2017.) Rakentamista ohjataan energiamuotokertoimilla vähähiilisempään ja energiatehokkaampaan suuntaan, sillä rakennuksen energiatehokkuus riippuu vahvasti rakennuksessa käytetystä energiamuodosta. Esimerkiksi

sähköllä lämmitettävä rakennus tulee suunnitella energiatehokkaammaksi kuin vastaava kaukolämmöllä lämmitettävä rakennus. Tämä johtuu siitä, että sähkön energiamuotokerroin (1,20) nostaa laskennallista lämmitysenergiankulutusta 20 % kun taas kaukolämmön kerroin (0,5) pienentää laskennallista kulutusta 50 %.

Taulukko 1. Voimassa olevat energiamuotokertoimet (A 1010/2017).

Sähkö	1,20
Kaukolämpö	0,50
Kaukojäähdytys	0,28
Fossiiliset polttoaineet	1,00
Rakennuksessa käytettävät uusiutuvat polttoaineet	0,50

Rakennuksen energiatehokkuusvaatimusten toteutuminen asuinrakennusten osalta voidaan osoittaa vaihtoehtoisesti myös rakenteellisella energiatehokkuudella. Rakenteellisen energiatehokkuuden menetelmässä rakennuksen energiatehokkuuden vaatimuksenmukaisuutta tarkastellaan kolmen ehdon mukaan, jotka koskevat rakennuksen lämpöhäviötä sekä ilmanvaihto- ja lämmitysjärjestelmää. Ehtojen mukaan rakennuksen lämpöhäviö ei saa olla suurempi kuin vastaavan vertailurakennuksen lämpöhäviö. Vertailurakennuksen lämpöhäviön laskemisessa käytetään maankäyttö- ja rakennuslain asetuksessa 1010/2017 annettuja arvoja rakennusosien lämmönläpäisykertoimille, ilmanvaihdon lämmöntalteenoton vuosihyötysuhteelle ja ilmavuotoluvulle. Annetut arvot ovat energiatehokkuusnäkökulmasta tarkasteltuna tiukempia kuin E-luvun laskennassa vastaaville tekijöille asetetut arvot. Lämpöhäviövaatimuksen täyttymisen lisäksi rakennuksessa tulee olla ominaissähköteholtaan enintään 1,5 kW(m³/s) koneellinen tulo- ja poistoilmanvaihto ja rakennuksen lämmitysjärjestelmänä ilma-vesilämpöpumppu, kaukolämpö tai maalämpö. (A 1010/2017.)

Rakennuksen lämpöhäviöitä pienentämällä voidaan parantaa rakennuksen energiatehokkuutta ja samalla pienentää käytönaikaista hiilijalanjälkeä. Käytännössä lämpöhäviöitä voidaan pienentää rakentamalla hyvin lämpöeristettyjä ja ilmatiiviitä rakenteita sekä käyttämällä energiatehokasta

talotekniikkaa mm. ilmanvaihtoa, jossa on korkean vuosihyötysuhteen omaava lämmöntalteenotto. Rakennuksen lämmöneristävyyttä suunniteltaessa on kuitenkin huomioitavaa, että nykyiselläänkin Suomen rakentamismääräykset edellyttävät uudisrakennuksen energiatehokkuudeksi lähes nollaenergiatasoa ja mm. rakennusosien lämmönläpäisykertoimien vertailuarvot ovat rakenteiden kosteusteknisen toiminnan näkökulmasta jo melko tiukkoja. Energiatehokkuuden parantamisessa nähdäänkin riskejä rakenteiden kosteusteknisen toiminnan kannalta, mikäli energiatehokkuutta parannetaan suunnittelemalla rakennukseen määräysten mukaista vertailutasoa paremmin lämmöneristettyjä rakenteita (Vinha, Laukkarinen, Mäkitalo, Nurmi, Huttunen, Pakkanen, Kero, Manelius, Lahdensivu, Köliö, Lähdesmäki, Piironen, Kuhno, Pirinen, Aaltonen, Suonketo, Jokisalo, Teriö, Koskenvesa & Palolahti 2013, 2). Vinhan ym. (2013,2) tutkimusten mukaan rakenteiden kosteus- ja mikrobivaurioitumisen riski kasvaa toisaalta rakenteiden lämmöneristysten lisäyksen mutta myös ilmaston lämpenemisen myötä. Lämmöneristystä lisäämällä rakenteet läpäisevät vähemmän lämpöä, mikä puolestaan heikentää rakenteiden kuivumiskykyä. Rakennuksen ulkovaipan rakenteet tarvitsevat lämpöä, jotta rakenteisiin kertyvä kosteus kuivuu pois. Kuivumisen mahdollistamiseksi ulkovaipan rakenteiden tulee olla suunniteltu myös muilta osin Suomen ilmastoon sopiviksi, mm. kerroksellisten rakenteiden vesihöyryn vastus tulee lähtökohtaisesti pienentyä ulkoilmaa kohden, lisäksi rakenteiden tulee olla sisäpinnastaan ilmatiiviitä ja ulkopinnastaan suojattu tuulelta sekä sateilta. Ilmastomuutoksen aiheuttama sademäärän ja ilman suhteellisen kosteuden kasvu, lämpötilan nousu sekä tuulisuuden lisääntyminen lisäävät osaltaan rakenteiden kosteusrasitusta ja heikentävät rakenteiden kuivumista, mikä voi heikentää jo ennestään heikosti kuivuvien tehokkaasti eristettyjen rakenteiden toimintaa. (Mts. 2.)

Vinhan ym. (2013) tutkimuksen mukaan uudisrakennuksen vaipan lämmöneristävyuden parantamisella määräysten edellyttämästä tasosta esim. passiivitasoon on melko pienet vaikutukset erityisesti kerrostalo- ja toimistorakennusten energiankulutukseen. Esimerkiksi kerrostalon osalla säävutettava säästö ostoenergiankulutuksessa vuoden 2012 ilmastossa vaihtelee rakennuksen lämmitys- ja jäähdytysratkaisusta riippuen välillä 0,6–1,9 kWh/(m²a) ja vuoden 2050 ilmastossa 0,5–1,4 kWh/(m²a) (Vinha ym. 2013, 298). Tämä johtuu siitä, että ilmaston lämpenemisen myötä rakennusten lämmitystarve vähenee ja toisaalta jäähdytystarve kasvaa (mts. 335–336). Koska energiankulutus muodostaa merkittävän osan rakennuksen elinkaaren hiilijalanjäljestä, on lämmöneristysten parantamisella määräysten edellyttämästä tasosta paremmaksi arviolta vastaava pienehkö vaikutus myös kerrostalo- ja toimistorakennusten käyttösidonnaiseen hiilijalanjälkeen.

Pientalojen osalla määräyksiä parempi ulkovaipan rakenteiden lämmöneristävyys nähdään kuitenkin potentiaalisena energiatehokkuuden parantamiskeinona, laskennallisesti tarkasteltuna ostoennergiankulutuksen säästö on välillä 5,5–17,3 kWh/(m²a) vuoden 2012 ilmastossa ja 4,8–15,1 kWh/(m²a) vuoden 2050 ilmastossa (mts. 297).

Vinhan ym. (2013, 297–301) mukaan energiatehokas talotekniikka on loppujen lopuksi kuitenkin merkittävästi hyödyllisempi tapa parantaa rakennuksen energiatehokkuutta kuin määräystasoa parempi rakenteiden lämmöneristävyys. Myös rakennuksen hiilijalanjäljen näkökulmasta voi rakennuksen lämmitysmuodosta riippuen olla suositeltavampaa energiatehokkuuden parantamisen sijaan tarkastella ensin rakennuksen lämmitysmuotoa ja tämän jälkeen tarvittaessa suunnitella energiatehokkuuden parantamiseen ja sen myötä päästöjen vähentämiseen tähtääviä toimenpiteitä. Huuhka ja muut (2021) esittävät purkavan uudisrakentamisen ja peruskorjaamisen hiilijalanjälkeä ja elinkaarikustannuksia vertailevassa tutkimuksessaan, että maalämmön käyttö sekä uudisrakennuksessa että peruskorjattavassa rakennuksessa voi tuoda jo lähtökohtaisesti selkeät päästövähennykset. Esimerkiksi tutkimuksessa tarkastellun olemassa olevan 1970-luvun asuinkerrostalon lämmitysmuodon vaihtaminen kaukolämmöstä maalämpöön pienentäisi rakennuksen elinkaaren päästöjä 50 %. Vertailukohteena käytetyn uuden betonielementtikerrostalon kohdalla vastaavalla lämmitysmuodon vaihtamisella saavutettaisiin 35 % päästövähennys. (Huuhka ym. 2021, 106–109.) Lämmitysmuodon vaikutus päästöjen pienemiseen riippuu kuitenkin edelleen energiatehokkuudesta; energiatehokkaassa rakennuksessa lämmitysmuodon vaikutus on pienempi, johtuen elinkaaren aikaisesta pienemmästä energiankulutuksesta (mts. 68).

Edellä mainittujen tutkimusten (Vinha ym. 2013; Huuhka ym. 2021) mukaan rakennuksen lisäeristäminen ei välttämättä paranna kovin merkittävästi rakennuksen energiatehokkuutta, eikä siten suoraan pienennä ostoennergiankulutusta ja elinkaaren kasvihuonekaasupäästöjä. Lisäeristämällä voidaan kuitenkin parantaa peruskorjattavien rakenteiden kosteusteknistä toimintaa ja vaikuttaa siten rakenteiden käyttöikään. Pidemmän käyttöiän myötä erityisesti rakennuksen tuotesidonnaisen päästöjen hiilijalanjälki pienenee tuote- ja rakentamisvaiheen hiili-investointien jakautuessa pidemmälle ajalle (Huuhka ym. 2021, 35). Lisäeristämisessä tulee kuitenkin huomioida olemassa olevan rakenteen kosteusteknisen toiminnan ominaispiirteet. Huomiota tulee kiinnittää mm. rakenteeseen kertyvän kosteuden kuivumissuuntiin, eri rakennekerrosten tiiveyksiin niin veden, ve-

sihöyryn kuin myös ilman osalta, rakenteen tuulettuvuuteen ja lämpötilajakaumaan sekä kylmäsi-
toihin. Lähtökohtaisesti lisäeristäminen on suositeltavaa toteuttaa rakenteen ulkopuolelle hyvin
vesihöyryä läpäisevällä eristeellä, jolloin olemassa oleva rakenne lämpenee ja suhteellinen kosteus
rakenteen eri osissa pienenee. Rakenteita voidaan lisäeristää myös sisäpuolelta mutta tällöin ole-
massa olevan rakenteen ja lisäeristeen rajakohdan lämpötila alenee, mikä voi mm. lisäeristeen si-
säpinnan vesihöyrynvastuksesta riippuen mahdollistaa mikrobikasvulle suotuisat olosuhteet.

(Nurmi 2012, 121–123.)

5 Rakennuksen vähähiilisyyden arviointimenetelmä

Maankäyttö- ja rakennuslain uudistus on ollut käynnissä vuodesta 2018 ja keväällä 2023 edus-
kunta hyväksyi uuden rakentamislain, jonka yhtenä uutena sisältönä on vaatimukset rakennusten
elinkaarelle ja vähähiilisyydelle, laki tulee voimaan 1.1.2025 (Eduskunta hyväksyi rakentamisen
päästöjä pienentävät ja digitalisaatiota edistävät lait 2023). Vähähiilisyystarkastelujen pohjaksi Ym-
päristöministeriö julkaisi vuonna 2019 rakennusten vähähiilisyyden arviointiin käytettävän mene-
telmän ”Rakennuksen vähähiilisyyden arviointimenetelmä”, joka pohjautuu EN-standardeihin
(mm. EN 15643 –sarja, EN 15978 ja EN 15804) ja Euroopan komission rakennusten resurssitehok-
kuutta mittaavaan Level(s)-menetelmään (Level(s) 2022; Rakennuksen vähähiilisyyden arviointi-
menetelmä 2019). Menetelmäohjeen lisäksi Ympäristöministeriö julkaisi Excel-työkalun ”Raken-
nuksen vähähiilisyyden arviointityökalu”, jota hyödyntämällä vähähiilisyyden arviointimenetelmää
pilotoitiin erilaisissa rakentamisen hankkeissa. Ympäristöministeriön arviointimenetelmää on päi-
vitetty sen julkaisun jälkeen vuonna 2020 ja luonnosversio ohjeeksi rakennusten vähähiilisyyden
arviointiin on ollut lausuntokierroksella vuonna 2021. Arviointimenetelmästä on tulossa vielä vii-
meinen versio, jonka julkaisu odottaa rakennuksen vähähiilisyyden arviointia koskevan asetuksen
voimaantulua. (Vähähiilisen rakentamisen tiekartta 2022.)

Ympäristöministeriön julkaisema Rakennuksen vähähiilisyyden arviointimenetelmä sisältää ohjeis-
tukset rakennuksen elinkaaren hiilijalanjäljen ja hiilikädenjäljen arvioimiseksi. Arviointimenetel-
mässä hiilijalanjäljellä tarkoitetaan rakennuksen elinkaaren aikana muodostuvien kasvihuonekaa-
supäästöjen summaa hiilidioksidiekvivalenteiksi muutettuna. Hiilijalanjälki käsittää näin ollen
rakennuksesta sen elinkaaren aikana aiheutuvia ilmaston kannalta negatiivisia, ilmastoa lämmittä-
viä vaikutuksia (Rakennuksen vähähiilisyyden arviointimenetelmä 2019, 40). Arviointimenetel-
mässä käsiteltävä rakennuksen elinkaaren hiilikädenjälki sisältää puolestaan elinkaaren aikana

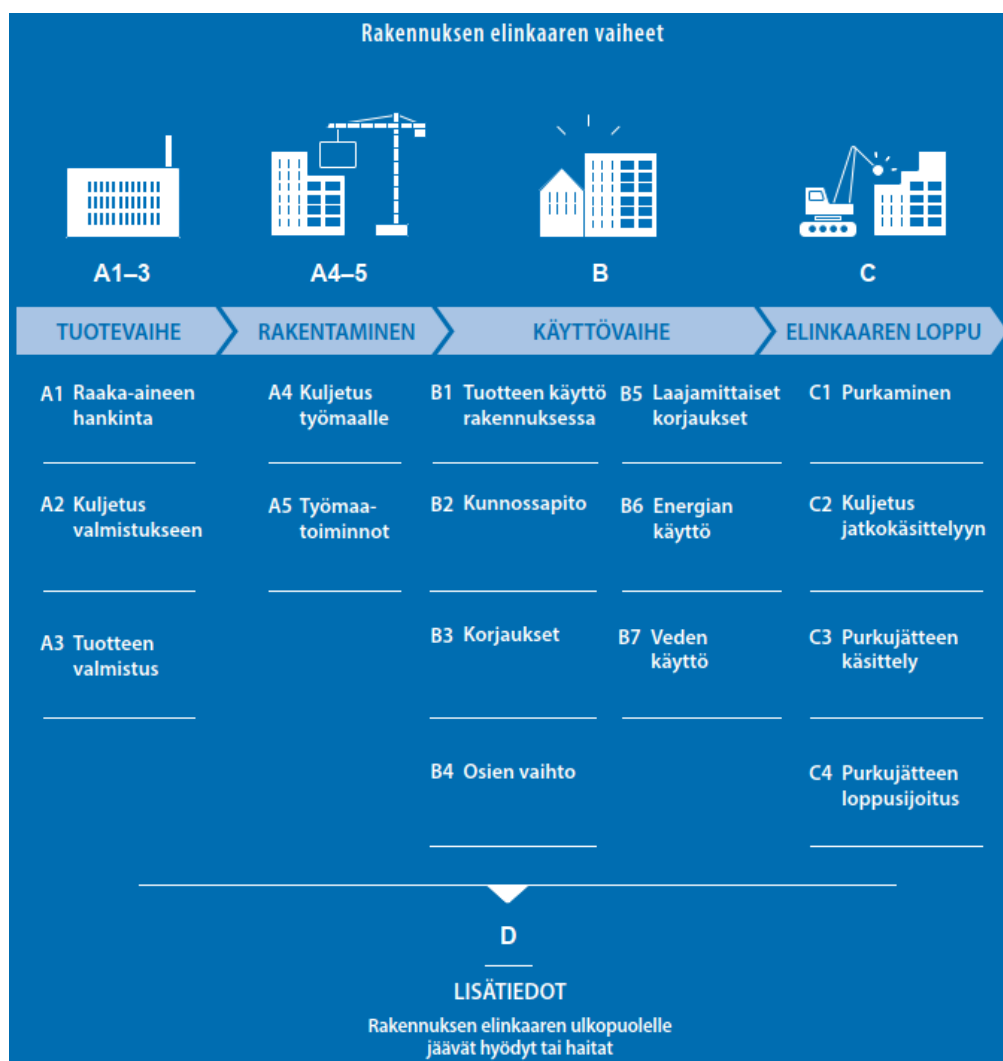
muodostuvat rakennuksen positiiviset ilmastovaikutukset, joilla voidaan kompensoida hiilijalanjäljen ilmastovaikutuksia. Hiilikädenjälkeä ovat esimerkiksi rakennuksessa tai tontilla tuotettu uusiutuva ylimääräinen energia ja rakennusmateriaalien kyky sitoa ilman hiilidioksidia elinkaaren aikana. (Mts. 30.)

Rakennuksen vähähiilisyyden arviointimenetelmässä huomioidaan lähtökohtaisesti rakennuksen kaikki rakenteet aina perustuksista vesikattoon asti. Arvioinnissa ei kuitenkaan huomioida esimerkiksi maalauksia ja pintakäsittelyjä tai rakenteiden pienempiä osia, kuten kiinnikkeitä. Tontin osalta huomioidaan mm. tontin päällysteet ja maaosat. Talotekniikasta arviointimenetelmässä huomioidaan LVIS-järjestelmät mutta ei automaatiota tai esimerkiksi tietoteknisiä järjestelmiä. Tarkempi erittely arviointimenetelmässä huomioitavista rakennuksen osista ja järjestelmistä on esitetty kuviossa 11. Rakennuksen vähähiilisyyden arviointimenetelmää voidaan käyttää kaikenlaisten rakennusten vähähiilisyyden arviointiin. Menetelmällä voidaan arvioida niin uudisrakennushankkeiden, kuin myös korjaushankkeiden vähähiilisyyttä. (Mts. 12.) Menetelmää suositellaan käyttämään kuitenkin ainoastaan rakennusten arviointiin, eikä se sovellu käytettäväksi sellaiseen esimerkiksi infrahankkeiden vähähiilisyyden arvioinnissa. Infrahankkeille on julkaistu oma päästötietokanta joulukuussa 2022 ja infrahankkeisiin soveltuva vähähiilisyyden arviointimenetelmä on Väyläviraston toimesta pilotointivaiheessa (Infrarakentamisen hiilijalanjälki haltuun tietoa hyödyntämällä 2022).

Arvioitavat hankkeet	Uudisrakentaminen, laajamittaiset korjaukset	
Arvioitavat rakennustyytit	1–2 Asuinrakennus 3 Toimisto ja terveystakeskus 4 Liikerakennus, teatteri, kirjasto, museo 5 Majoitusliikerakennus, hotelli, asuntola, palvelutalo, vanhainkoti, hoitolaitos 6 Opetusrakennus ja päiväkoti 7 Liikuntahalli (lukuun ottamatta uimahallia ja jäähallia) 8 Sairaala 9 Muu rakennus	
Arvioitavat rakennusosat	Arvioidaan	Ei arvioida
Tontti	Maatyöt, tuennat ja vahvistukset, päällysteet, alueen rakenteet	Alueen varusteet, kasvillisuus, maaperä ja vesistöt
Kantavat rakenteet	Perustukset, alapohjat, runko, julkisivut, ovet ja ikkunat, ulkotasot, vesikatot	Erilliset kiinnikkeet
Täydentävät rakenteet	Väliseinät, ovet, portaot, pintarakenteet, kiintokalusteet, hormit ja tulisijat, tilaelementit	Listat, pintamateriaalit ja -käsittelyt, erilliset kiinnikkeet
Talotekniikka	Energiajärjestelmät, vesi- ja viemärijärjestelmät, ilmastointijärjestelmät, sähkön jakelu- ja käyttöjärjestelmät, aurinkopaneelit ja -keräimet, hissit	Tietotekniset järjestelmät, varavirta, liukuportaat, erilliset koneet ja laitteet
Työmaa	Kulutettu energia	Telineet ja suojaukset, väliaikaiset rakenteet, muotit, työmaatilojen elinkaari, työmaan henkilöliikenne
Arviointijakso	50 vuotta tai tavoitekäyttöikä (jos käytetty suunnittelun lähtökohtana)	
Vertailuyksikkö	1 m ² rakennuksen lämmitettyä nettoalaa / vuosi	

Kuvio 11. Vähähiilisyiden arviointimenetelmän rajaukset (Rakennuksen vähähiilisyiden arviointimenetelmä 2019, 38).

Rakennuksen vähähiilisyiden arviointimenetelmässä rakennuksen elinkaari on jaettu standardin EN 15643:2021 - Sustainability of construction works mukaisiin vaiheisiin, vaihteita ovat: tuotevaihe, rakentaminen, käyttövaihe ja elinkaaren loppu (kuvio 12). Tuotevaihe A1–A3 sisältää tuotteen valmistamisessa muodostuvan hiilijalanjäljen raaka-aineen hankinnasta aineen kuljetukseen ja tuotteen valmistamiseen. Rakentamisvaihe A4–A5 sisältää tuotteiden kuljetuksen työmaalle ja työmaatoiminnot mm. työmaan energiankulutuksen. Käyttövaiheessa B tarkastellaan mm. tuotteiden käytöstä, kunnossapidosta, korjauksista ja energiankäytöstä aiheutuvaa hiilijalanjälkeä. Elinkaaren loppuvaihe C sisältää puolestaan rakennuksen purkamisesta, jätteenkuljetuksesta, jätteenkäsittelystä ja loppusijoituksesta syntyvän hiilijalanjäljen. Vaihe D on rakennuksen elinkaaren ulkopuolelle ajoittuvat ajanjakso, joka sisältää elinkaaren ulkopuolisen ympäristövaikutusten laskennan mm. materiaalien ja rakennusosien uudelleenikäytön. (Rakennuksen vähähiilisyiden arviointimenetelmä 2019, 48.)



Kuvio 12. Rakennuksen elinkaaren vaiheet (Rakennuksen vähähiilisyyden arviointimenetelmä 2019, 10).

Materiaalien hiilijalanjäljen arviointi

Materiaalien hiilijalanjäljen arvioimiseksi rakennuksessa käytettävistä materiaaleista tulee kerätä määrätiedot arviointimenetelmän rajaukset huomioiden. Päästölaskentaa varten määrätiedot tulee muuttaa materiaalien ominaistiheyskertoimilla esimerkiksi painokiloiksi, sillä päästökertoimien yksikkönä käytetään yleisesti $\text{kgCO}_2\text{e/kg}$. Materiaalien ominaistiheystietoja ja päästökertoimia on saatavilla Ympäristöministeriön ja Suomen ympäristökeskuksen julkaisemasta ”Rakentamisen päästötietokannasta”. Materiaalien määrissä mukaan arvioidaan myös työmaan hukkamateriaalit. Korjaushankkeissa rakennuksen materiaaleista huomioidaan ainoastaan korjauksen yhteydessä rakennettavat uudet rakenteet, esim. rakennuksen laajennusosat, ja korjattavien rakennusosien

uudet materiaalit. Mikäli korjaushankkeessa on tarkoitus hyödyntää vanhoja rakennusosia esimerkiksi ikkunoita, niin tällaiset rakennusosat jätetään arvioinnista pois. Talotekniikan hiilijalanjälki voidaan arvioida menetelmäohjeen neliökohtaisia taulukkoarvoja hyödyntäen tai laskemalla tarkemmin talotekniikan osien määrätietojen pohjalta. (Mts. 17–18.)

Rakennusmateriaalien kulumisen huomioidaan määrittämällä tuotteille niiden vaihtovälit. Tuotteiden vaihtovälit voidaan arvioida RT-kortin 18-10922 (Kiinteistön tekniset käyttöiät ja kunnossapitojaksot) tai Rakentamisen päästötietokannan käyttöikäoletusten mukaan, vaihtovälit voidaan vaihtoehtoisesti myös laskea. Vaihtoväli saadaan laskettua vertaamalla rakennuksen käyttöikää tuotteen suunnittelukäyttöikään ks. kaava 1. (Mts. 19–20.)

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

Rakennuksen elinkaaren lopussa materiaalit puretaan ja kuljetetaan jätteenkäsittelyn kautta loppusijoitukseen. Materiaalien loppuvaiheen (C1–C4) hiilijalanjälki lasketaan käyttämällä valmiita taulukkoarvoja tai vaihtoehtoisesti lasketaan tarkemmin jätemateriaalivirtojen eri skenaarioiden avulla. Mikäli materiaaleja hyödynnetään energiana, voidaan materiaaleista saatava energia huomioida hiilikädenjälkenä (mts. 21).

Kuljetusten hiilijalanjäljen arviointi

Kuljetusten hiilijalanjälki voidaan huomioida yksinkertaistetulla taulukkoarvioihin perustuvalla menetelmällä tai laskemalla. Taulukkoarvioihin perustuvassa arviointitavassa kuljetusten hiilijalanjälki saadaan muutettua hiilidioksidiekvivalenttikiloiksi kertomalla rakennuksen lämmitetty nettoala menetelmäohjeen liitteen 3 taulukossa esitetyillä kuljetusten neliökohtaisilla päästötiedoilla (taulukko 2). Rakennuksen yhdelle neliölle kohdistuva hiilijalanjälki saadaan puolestaan jakamalla taulukkoarvo rakennuksen tavoitellulla käyttöiällä. Mikäli kuljetusten hiilijalanjälki halutaan laskea tarkemmin, tulee kuljetusväilyt arvioida rakentamisvaiheessa, käytön korjausten aikana sekä elinkaaren loppuvaiheessa. Kuljetukset tulee tällöin laskea jokaiselle kuljetukselle erikseen ja huomioida lisäksi eri kuljetusmuotojen vaikutukset, myös eri polttoaineiden käyttö. (Mts. 23–25.)

Taulukko 2. Hiilijalanjäljen laskennassa käytettävät taulukkoarvot (Rakennuksen vähähiilisyyden arviointimenetelmä 2019, 45).

Tyypilliset päästöt (kgCO ₂ e/m ²)		
A1–3 Valmistus		<i>(lasketaan aina hankekohtaisin tiedoin)</i>
A4 Kuljetus työmaalle	10,20	Keskimääräinen kuljetusetäisyys Suomessa
A5 Uudisrakennustyömaan toiminnot	27,30	Työmaan energian ja polttonesteiden kulutus
B3–4 Korjausten energiankulutus ¹²	2,16	Materiaalien valmistus arvioitava erikseen
B6 Energian käyttö		<i>(lasketaan aina hankekohtaisin tiedoin)</i>
C1 Purkutyömaan toiminnot	7,80	Työmaan energian ja polttonesteiden kulutus
C2 Kuljetus jatkokäsittelyyn	10,20	Keskimääräinen kuljetusetäisyys Suomessa
C3–4 Jätteenkäsittely ja loppusijoitus	15,60	
Yhteensä	73,26	kgCO ₂ e/m ²

Työmaan hiilijalanjäljen arviointi

Työmaan hiilijalanjäljen arviointi voidaan tehdä kuljetusten ja talotekniikan hiilijalanjäljen arviointia vastaavasti käyttämällä laskennassa taulukossa 3 esitettyjä valmiita neliökohtaisia arvoja tai tarkemmin laskemalla. Tarkemmassa menetelmässä työmaan hiilijalanjälki lasketaan rakennusvaiheesta, korjauksista ja rakennuksen elinkaaren lopun purkuvaiheesta. Työmaan hiilijalanjäljen laskemiseksi tulee selvittää työmaalla käytettävän ostoenergian määrä. Ostoenergiaan sisällytetään laajasti työmaan eri osa-alueet, laskennassa huomioidaan käytännössä kaikki työmaalla kulutettu energia sisältäen väliaikaiset työmaarakennukset sekä työmaan toiminnot, kuten kuivatukset, lämmitykset ja valaistus. Työmaalla kulutetun ostoenergian osalta tulee myös selvittää millä energiamuodolla käytetty energia on tuotettu, sillä työmaan ostoenergian hiilijalanjälki lasketaan polttoaineiden ja energiamuotojen päästökertoimilla. Työmaan hiilijalanjälki lasketaan samoilla periaatteilla rakennuksen rakentamisvaiheesta, korjausvaiheesta sekä purkuvaiheesta. Korjaus- ja purkuvaiheissa on kuitenkin huomioitava, että energiamuotojen ja polttoaineiden päästöjen arvioidaan vähenevän tulevaisuudessa, mistä johtuen kertoimina käytetään arvioidun korjaus- ja purkuajankohdan mukaisia kertoimia. (Mts. 46.)

Taulukko 3. Energiamuotojen ja polttoaineiden päästökertoimet (Rakennuksen vähähiilisyyden arviointimenetelmä, 46).

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

Käytön aikaisen energiankulutuksen hiilijalanjäljen arviointi

Rakennuksen vähähiilisyyden arviointimenetelmässä käytön aikaisen energiankulutuksen hiilijalanjälki arvioidaan rakennuksen ostoenergian kulutuksen perusteella. Ostoenergian kulutuksen laskenta tehdään kaikille rakennuksessa käytettäville energiamuodoille rakennuksen energiatehokkuusasetusta 1010/2017 (Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen energiatehokkuudesta) noudattaen. Laskenta tehdään asetuksen mukaisesti niin uudisrakennukselle kuin myös olemassa olevalle rakennukselle. Ostoenergian kulutuksen laskennan jälkeen käytön aikaisen energiankulutuksen hiilijalanjälki saadaan arvioitua kertomalla eri energiamuotojen kulutukset ominaispäästökertoimilla. Energiankulutuksen hiilijalanjäljen arvioinnissa energiamuotojen ja polttoaineiden tulevaisuuden päästökehitys huomioidaan käyttämällä eri vuosikymmenille ennakoituja energiamuotojen päästökertoimia. (Mts. 29.)

6 Hiilijalanjälkilaskennan toteutus

6.1 Laskentakohteen kuvaus

6.1.1 Rakennuksen geometria

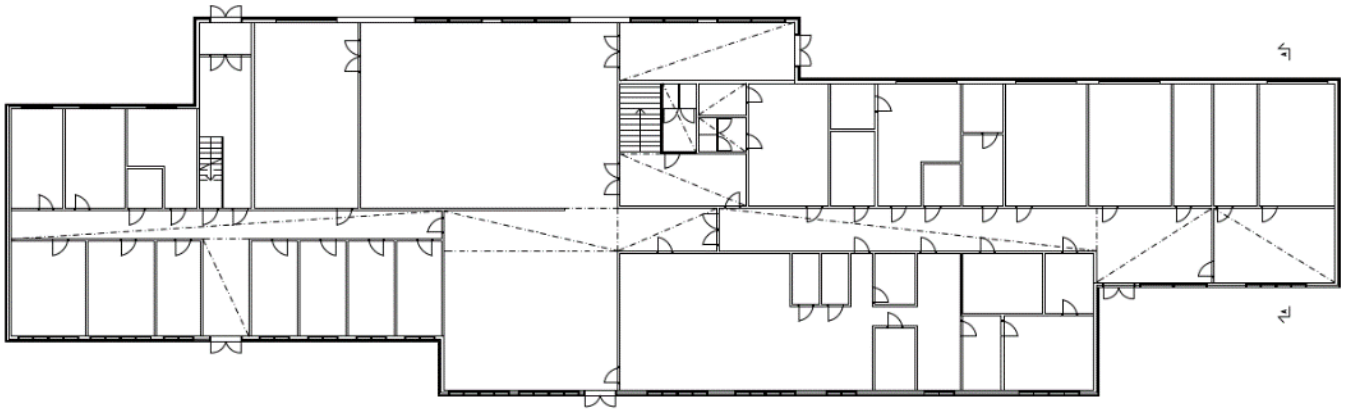
Peruskorjauksen hiilijalanjäljen laskennan kohteeksi määritettiin 1970-luvulla valmistunut opetus- käyttöön tarkoitettu rakennus. 1970-luvulla valmistuneet rakennukset ovat rakennusten tavanomainen 50 vuoden käyttöikä huomioiden käyttöikänsä päässä, jolloin rakennuksen elinkaarta ajatellen kyseeseen tulee pääasiassa joko rakennuksen purkaminen ja korvaaminen uudella tai vaihtoehtoisesti rakennuksen mittava peruskorjaaminen. Korjaus- tai purkupäätökseen vaikuttavat

tekijät ovat moninaisia, päätöksiä tehtäessä on huomioitava mm. rakennuksen nykykunto ja korjausten tekninen toteutettavuus, rakennuksen tilojen soveltuvuus rakennuksen käyttötarkoituksen mukaiseen toimintaan jatkossa ja korjauksen tai purkavan uudisrakentamisen taloudellinen kannattavuus. Opetusrakennuksen osalta päätöksentekoon vaikuttaa myös erinäiset selvitykset mm. kouluverkkoselvitykset, joiden myötä rakennuksen säilyttäminen tai uuden vastaavan rakentaminen voidaan todeta jo lähtökohtaisesti tarpeettomiksi esimerkiksi pienentyneiden oppilasmäärien vuoksi.

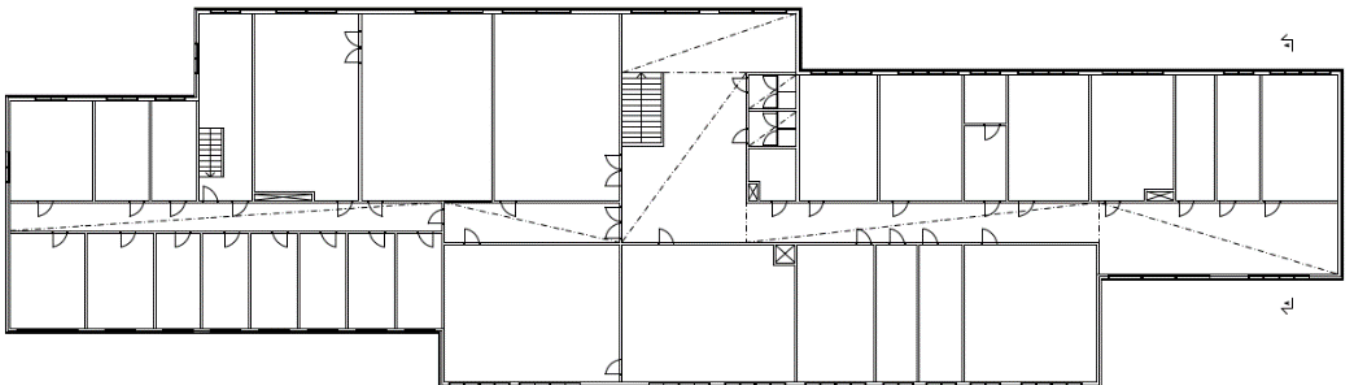
1970-luvun opetusrakennuksen peruskorjauksen hiilijalanjäljen laskennan lähtötiedoiksi ei ollut käytettävissä suoraan sopivaa laskentakohdetta, josta olisi saatu tarvittavat suunnitelma-asiakirjat mm. arkkitehti-, rakenne- ja lvis-suunnitelmat. Näin ollen laskentakohde päätettiin määrittää lopulta itse. Laskentakohteesta piirrettiin AutoCAD-ohjelmalla pohja- ja leikkauskuvat sekä rakenne-tyypit rakennuksen havainnollistamiseksi ja erityisesti määrälaskennan helpottamiseksi. Hiilijalanjäljen laskennan luotettavuuden parantamiseksi laskentakohteen geometriaa ei määritetty kokonaan itse, vaan geometrian pohjana käytettiin erästä toistaiseksi olemassa olevaa, joskin purettavaksi määrättyä, 1960-luvulla valmistunutta opetusrakennusta. Laskentakohteen pohjana käytetyn mallirakennuksen geometriaa muokattiin hieman yksinkertaisemmaksi muuttamalla rakennuksen yksittäinen maanvastainen seinälinja ulkoilmaan rajautuvaksi ja laajentamalla rakennusta erityisesti sisäänkäyntien kohdilta, jolloin rakennuksen kulmat ja ulokkeet vähenivät. Edellä mainittujen muutosten jälkeen hiilijalanjäljen laskentakohteeksi muodostui lämmitetyltä nettoalaltaan 2400 m² opetusrakennus, jossa on kaksi maanpäällistä kerrosta.

Laskentakohteen huonekorkeudeksi määritettiin 2,8 m, huonekorkeus on vastaava kuin mallirakennuksena käytetyssä 1960-luvun opetusrakennuksessa. Ikkunoiden ja ulko-ovien mittoina käytettiin mallirakennuksen rakennusosien mittoja. Ikkunoiksi määritettiin moduulimitoiltaan pääosin 17x16 ikkunoita, aulojen ja pinta-alaltaan isojen tilojen ikkunoiksi määritettiin 18x18 ikkunat. Ikkunoiden lukumäärää kasvatettiin mallirakennukseen verrattuna, sillä laskentakohteessa ei ole maanvastaisia seiniä toisin kuin mallina käytetyssä 1960-luvun rakennuksessa. Ikkunoiden määrää lisättiin maltillisesti, sillä lähtökohtaisesti oli tiedossa, että ikkunoiden lämpöhäviö on merkittävää suhteessa muihin rakennusosiin, mikä nostaa rakennuksen ostoenergiankulutusta ja vaikuttaa siten rakennuksen hiilijalanjälkeen. Laskentakohteen ikkunoita lisättäessä huomioitiin Ympäristöministeriön asetuksessa esitetty vaatimus työtilojen ikkunoiden vähimmäispinta-alasta, asetuksen

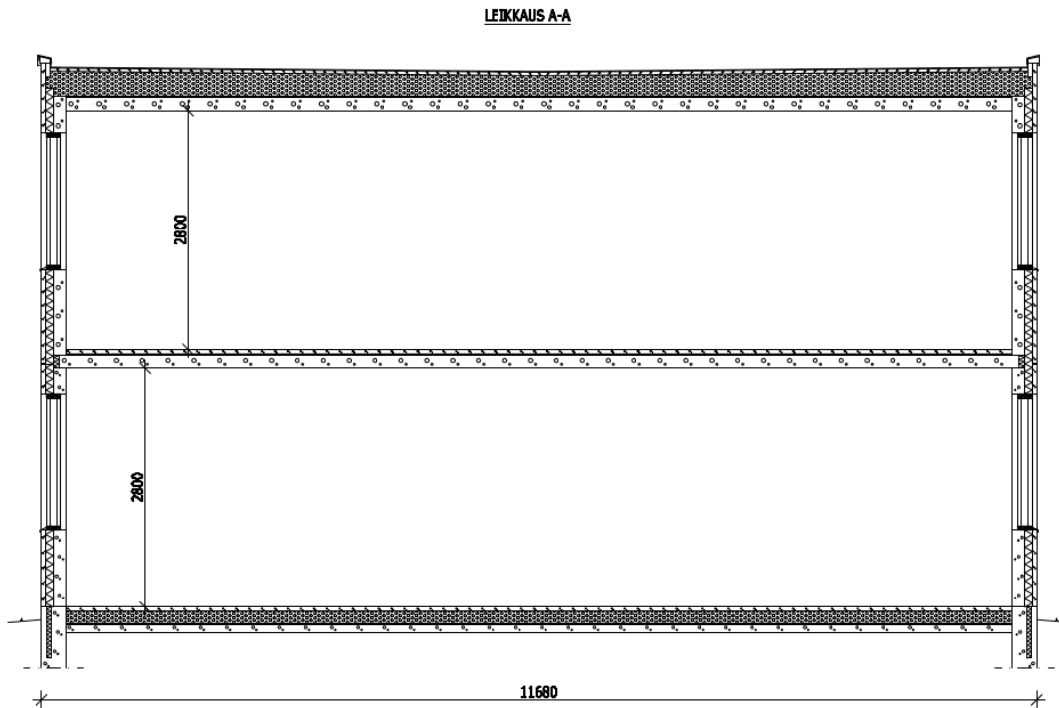
mukaan valoaukon tulee olla vähintään 10 % työtilan huonealasta (A 1007/17). Laskentakohteen ikkunoiden kokonaispinta-alaksi muodostui lopulta 13 % rakennuksen kokonaishuonealasta.



Kuvio 13. Laskentakohteen 1. kerroksen pohjakuva.



Kuvio 14. Laskentakohteen 2. kerroksen pohjakuva.



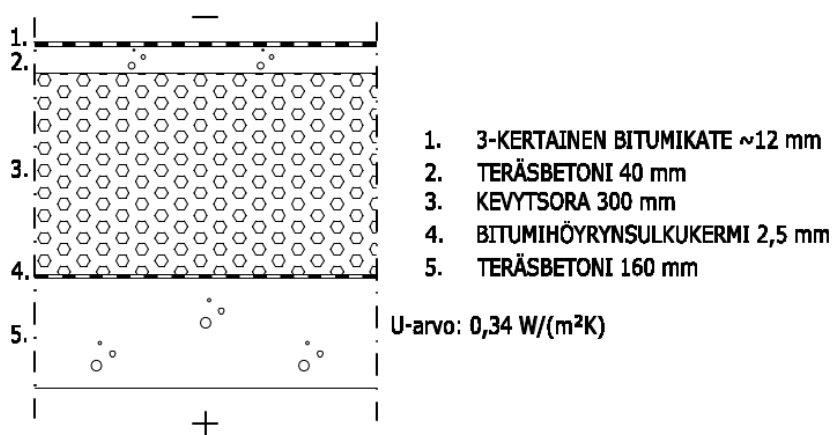
Kuvio 15. Laskentakohteen leikkauskuva.

6.1.2 Alkuperäiset rakennetyypit

Laskentakohteen rakennetyypeiksi määritettiin tyypilliset 1970-luvun julkisen rakennuksen rakennetyypit. Rakennetyypien määrittäminen tehtiin pitkälti Rakennustiedon julkaisun ”Kerrostalot 1960–1975” pohjalta mutta määrittämisessä hyödynnettiin myös kokemusperäistä tietoa 1970-luvun opetusrakennusten rakennetyypeistä. 1970-luvun rakennukseen on voitu tehdä sen elinkaaren aikana laajojakin korjauksia, joiden yhteydessä mm. rakennusosia on voitu korjata perusteellisesti uusimalla rakennetyypien rakennekerroksia uusilla vastaavilla rakennekerroksilla tai muuttamalla rakennetyyppejä kantavaa runkoa lukuun ottamatta kokonaisuudessaan esimerkiksi rakenteen kosteus- ja lämpöteknisen toiminnan parantamiseksi. Tässä työssä kohderakennuksen rakennusosien oletettiin kuitenkin olevan alkuperäiskunnossaan ja siten rakennetyyppeinä käytettiin tyypillisiä 1970-luvun rakennetyyppejä alkuperäisine rakennekerroksineen.

Yläpohja- ja vesikattorakenne

1970-luvulla rakennusten kattomuotona yleistyivät erilaiset tasakatot ja näin ollen myös laskentakohteen kattomuodoksi määritettiin tasakatto. Tasakattoja toteutettiin 1970-luvulla erilaisilla yläpohja- ja vesikattorakenteilla, pääasiassa vesikatot olivat matalia tuulettuvia puurakenteisia katto-rakenteita tai vaihtoehtoisesti yläpohja toimi samalla myös vesikattona, kuten esimerkiksi mineraalivillakatossa, jossa yläpohjan kantavan betonilaatan päälle asennettiin mineraalivillaeristeet ja villaeristeen päälle suoraan bitumikermikate. Vesikatteena tasakatoissa käytettiin bitumikermiä ja lämmöneristeenä pääosin mineraalivillaa tai kevytsoraa. (Mäkiö, Malinen, Neuvonen, Vikström, Mäenpää, Saarenpää & Tähti 2016, 75.) Laskentakohteen yläpohja- ja vesikattorakenteeksi määritettiin kevytsoraeristeinen rakenne, jossa yläpohjan kantavan betonilaatan päällä on höyrynsulkukerros, kevytsoralämmöneristys ja eristyksen päällä bitumivesikatteen alustana ohut teräsbetonivalu. Tasakatolla varustetussa rakennuksessa sadevedenpoisto on toteutettu yleensä sisäpuolisena poistona ja vesikatto on kallistettu kattokaivoja kohti. Vesikaton kallistukset on tehty kevytsorakerroksen kallistuksin ja lämmöneristekerroksen paksuudessa esiintyy mm. tästä johtuen hieman vaihtelua. Kevytsoraeristekerroksen paksuus vaihtelee tyypillisesti välillä 200 mm – 400 mm (mts. 75). Laskentakohteen yläpohjan eristekerroksen paksuudeksi määritettiin edellä esitetyn vaihteluvälin keskiarvo 300 mm. Alkuperäiseksi yläpohjarakenteeksi määritetty rakennetyyppi on esitetty kuviossa 16.



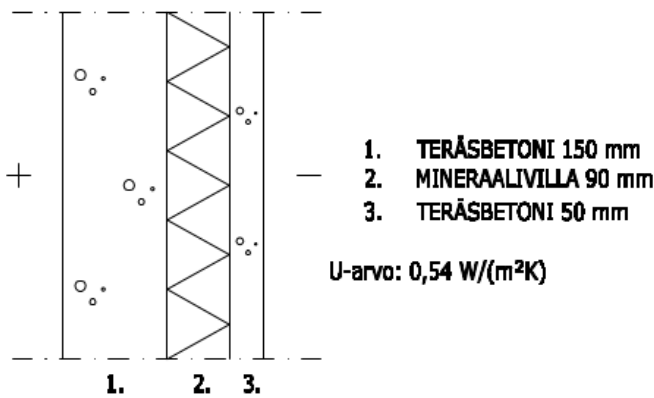
Kuvio 16. Laskentakohteen yläpohjan alkuperäinen rakennetyyppi.

Alkuperäisten rakenteiden lämmönläpäisykertoimet laskettiin DOF-Lämpö -ohjelmalla. Laskenta-ohjeena käytettiin Rafnet 2020 -projektin teoriaosion L(lämpö) materiaalia. Yläpohjan lämmönläpäisykerroin laskettiin korjattuna lämmönläpäisykertoimenä U_c , sillä yläpohjan kevytsoraeriste arvioitiin hyvin ilmaa läpäiseväksi, mikä arviolta mahdollistaa ilman liikkumisen lämpimän (kantavan betoniholvin yläpinta) ja kylmän pinnan (ohuen teräsbetonilaatan alapinnan) välillä ja näin ollen heikentää rakenteen lämmöneristävyyttä. Yläpohjan korjatuksi lämmönläpäisykertoimeksi U_c saatiin DOF-lämpö -ohjelmalla $0,34 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$.

Ulkoseinä

Elementtituotannon kehitys ja mm. BES-järjestelmän käyttöönotto lisäsivät elementtirakentamista erityisesti 1960-luvun loppupuolella ja 1970-luvun aikana. Yksi tyypillisimmistä 1970-luvun kerrostalojen ulkoseinärakenteista oli sandwich-elementit. Sandwich-elementtejä käytettiin myös julkisten rakennusten ulkoseinissä. Sandwich-elementissä teräsbetoninen ulkokuori on kannatettu teräsansaililla kantavasta tai ei-kantavasta teräsbetonisesta sisäkuoresta ja näiden välissä on ulkoseinän lämmöneriste. 1970-luvun sandwich-elementin ulkokuoren paksuus vaihtelee yleisesti välillä 40–60 mm, sisäkuoren paksuus riippuu puolestaan rakenteen kantavuudesta; ei-kantavan seinän sisäkuoren paksuus on 70–100 mm ja kantavan seinän 150–160 mm. Lämmöneristeenä on käytetty 1970-luvulla 90 mm paksuista mineraalivillaa. (Mäkiö ym. 2016, 78)

Laskentakohteen ulkoseinärakenteeksi määritettiin 1970-luvun sandwich-ulkoseinä. Ulkoseinän rakennetyypin rakennekerrokset määritettiin tyypillisen kantavan sandwich-ulkoseinän tietojen perusteella. Todellisuudessa rakennuksessa olisi sekä kantavia että ei-kantavia sandwich-ulkoseiniä, jotka poikkeaisivat toisistaan teräsbetonisen sisäkuoren paksuuden osalta. Tässä työssä toteutetun peruskorjauksen hiilijalanjälkitarkastelun kannalta sisäkuoren paksuuden vaihtelulla ei todettu olevan vaikutusta, sillä lasketussa korjauksessa ei tehdä muutoksia kantaviin rakenteisiin. Toisaalta betonisisäkuoren paksuuden vaihtelu kantavan ja ei-kantavan seinän välillä ei todettu myöskään aiheuttavan merkittävää muutosta rakenteen U-arvoon. Alkuperäiseksi ulkoseinän rakennetyypiksi määritetty rakenne on esitetty kuviossa 17.



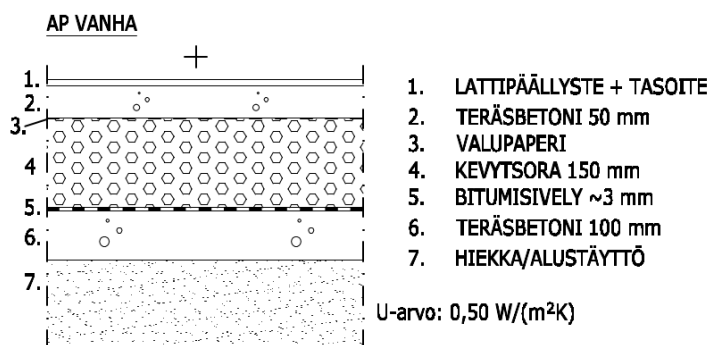
Kuvio 17. Laskentakohteen ulkoseinän alkuperäinen rakennetyyppi.

Ulkoseinän lämmönläpäisykerroin laskettiin tuulettumattomana rakenteena, sillä 1970-luvun sandwich-seinän lämmöneristeen tuulettuminen on arviolta vähäistä. Rakenteelle laskettiin korjattu lämmönläpäisykerroin U_c , sillä ulko- ja sisäkuoren väliset ansaat aiheuttavat rakenteeseen pistemäisiä kylmäsiltoja. Ulko- ja sisäkuoren väliset ansaat ovat rakentamisaikaan olleet yleensä 5 mm RST lankaa kk 575 (mts. 79). Ansaiden pistemäisten kylmäsiltojen neliökohtaisen lukumäärän määrittäminen tehtiin Peikon tuotetietojen perusteella ja ansastietoina käytettiin tuotetta (PD/PDM/PDR 150), joka on suositeltu 90 mm lämmöneristepaksuudelle. Tuotteen geometriasta pistemäisten kylmäsiltojen määräksi saatiin 8 kpl/m². Kylmäsiltojen määrittämisen jälkeen rakenteen korjatuksi lämmönläpäisykerroimeksi U_c saatiin DOF-lämpö -ohjelmalla 0,54 W/(m²K).

Alapohja

1970-luvulla maanvaraisina alapohjarakenteina käytettiin pääasiassa kolmea eri rakennetyyppiä; alapohjia rakennettiin alapuolelta eristettyinä, yläpuolelta eristettyinä sekä kaksoisbetonialapohjina, joissa lämmöneriste sijaitsi kahden teräsbetonilaatan välissä. Edellä mainituista rakennetyypeistä alapuolelta eristetyt alapohjat ja kaksoisbetonialapohjat olivat yleisimpiä (Suonketo & Annila n.d). Alapuoletta eristetyissä ja kaksoisbetonialapohjissa lämmöneristeenä käytettiin solupolystyreeniä, mineraalivillaa ja kevytsoraa/kevytsorabetonia, yläpuolelta eristetyissä puukoolatusta rakenteesta eristeenä oli yleensä mineraalivillaa. Laajarunkoisissa rakennuksissa rakennuksen keskiosissa alapohjan alla ei välttämättä ole käytetty lainkaan lämmöneristettä, lisäksi alapuolelta eristetyissä rakenteissa on tyypillistä, että ulkoseinälinjojen vierellä eristettä on hieman enemmän kuin muualla alapohjassa.

Laskentakohteen alapohjarakenteeksi määritettiin maanvarainen kaksoisbetonialapohja, jonka lämmöneristeenä on kevytsoraa. Alapohjan rakennekerroksina on alustäytön päälle valettu karkeapintainen pohjalaatta ja pohjalaatan pinnassa bitumisively, jonka tarkoituksena on ollut estää maaperän kosteuden nousua rakenteeseen. Bitumisivelyn päällä on kevytsoraeristys, valupaperi ja pintabetonilaatta. Laskentakohteen alkuperäiseksi alapohjaksi määritetty rakenne on esitetty tarkemmin kuviossa 18.

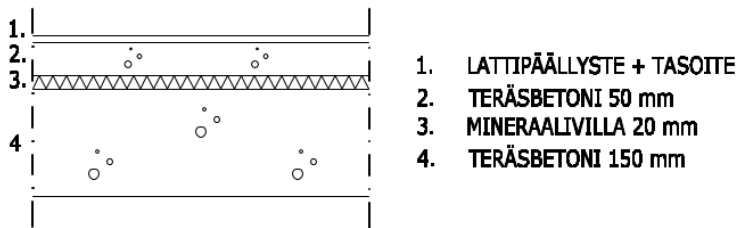


Kuvio 18. Laskentakohteen alapohjan alkuperäinen rakennetyyppi.

Alkuperäisen alapohjan lämmönläpäisykerroin laskettiin yksinkertaistetulla menetelmällä. Yksinkertaistetussa menetelmässä maanvaraisen alapohjan alapuolisen alustäytön lämmönvastus huomioidaan pienentämällä rakenteen U-arvoa 10 %. U-arvoksi ilman alustäytön lämmönvastuksen huomiointia saatiin DOF-Lämpö -ohjelmalla 0,56 W/(m²K) ja tämä kerrottiin kertoimella 0,9, jolloin rakenteen alkuperäiseksi U-arvoksi saatiin 0,50 W/(m²K).

Välipohja

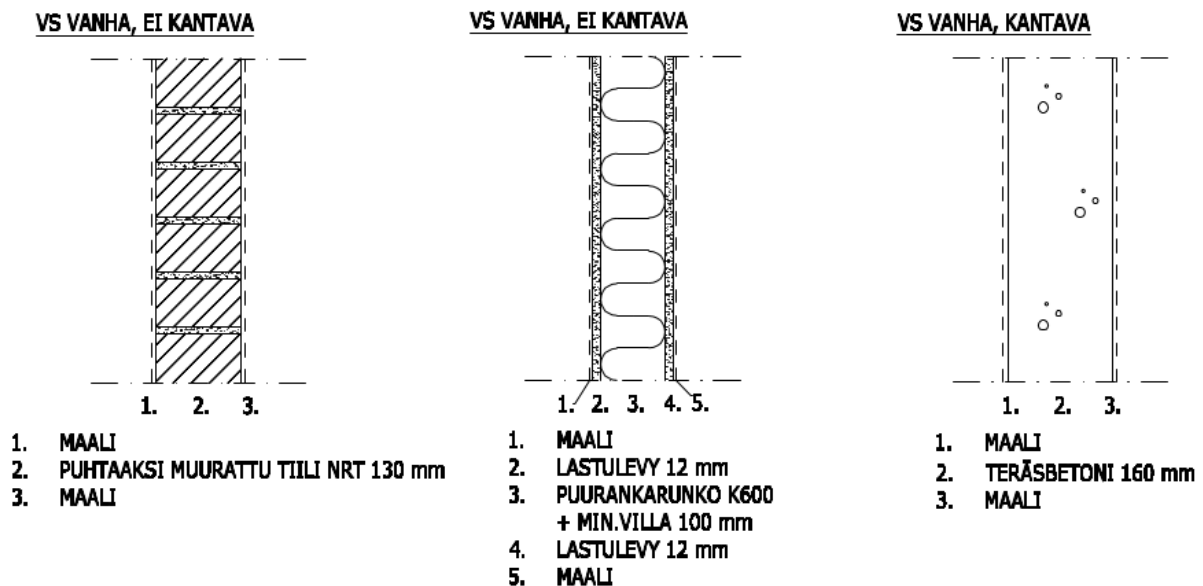
1970-luvulla välipohjarakenteet koostuivat yleisesti joko paikalla valetuista tai elementteinä valmistetuista massiivilaatoista. Ontelolaatoista rakennetut välipohjat yleistyivät 1970-luvun puolivälissä. (Suonketo & Annala n.d.) Välipohjissa käytettiin ääneneristeenä ohutta kerrosta esimerkiksi mineraalivillaa ja villan pintaan valettiin pintabetonilaatta tai vaihtoehtoisesti pintabetonilaatta valettiin suoraan kantavan välipohjalaatan päälle (Mäkiö ym. 2016, 71). Laskentakohteen alkuperäiseksi välipohjarakenteeksi määritettiin massiivinen teräsbetonilaatta, jonka pinnassa on ohut mineraalivillaeriste ja pintabetonilaatta. Laskentakohteen välipohjarakenne on esitetty kuviossa 19.

VP VANHA

Kuvio 19. Laskentakohteen välipohjan alkuperäinen rakennetyyppi.

Väliseinät

Laskentakohteen väliseiniksi määritettiin kantavia ja ei-kantavia väliseiniä. Väliseinien osalle tehtiin karkea jaottelu siten, että puolet väliseinistä on kantavia ja puolet ei-kantavia väliseiniä. Kantavien seinien rakennetyypiksi määritettiin 160 mm paksu teräsbetoniväliseinä, sillä rakennusajan kohdalle tyypillinen kantava väliseinä on paksuudeltaan 150–160 mm (mts. 70). Kevyistä väliseinistä puolet määritettiin levyrakenteisiksi väliseiniksi ja puolet tiiliseiniksi. Laskentakohteen alkuperäisinä väliseininä käytetyt rakennetyypit on esitetty tarkemmin kuviossa 20.



Kuvio 20. Laskentakohteen väliseinien alkuperäiset rakennetyypit.

6.2 Laskentakohteen peruskorjaus

6.2.1 Peruskorjauksen korjaustapavaihtoehto

Laskentakohteen peruskorjaus suunniteltiin Ympäristöministeriön julkaisuun ”Kosteus- ja mikrobivaurioituneiden rakennusten korjaus” pohjautuen. Julkaisu toimii käytännönläheisen tiedon lähteenä kosteus- ja mikrobivauriokorjausten suunnittelijoille sekä alan opiskelijoille (Weijo, Lahdensivu, Turunen, Ahola, Sistonen, Vornanen-Winqvist & Annila 2019, 3). Oppaassa esitetään periaateratkaisuja (A, B ja C) kosteus- ja mikrobivaurioituneiden rakennusosien korjaamiseen rakennuksen kolmelle eri käyttöikätaivoitteelle. Korjaustapavaihtoehdossa A rakenteisiin tehdään perusteellinen korjaus, jossa rakenne joko uusitaan kokonaisuudessaan tai rakennekerrokset uusitaan kantavaan rakenteeseen saakka. A-korjaustapavaihtoehdon käyttöikätaivoite on ≥ 50 vuotta. B-korjaustapavaihtoehdossa rakenteet uusitaan osittain ja samalla parannetaan rakenteiden ilmatiiveyttä sekä kosteusteknistä toimintaa, B-korjaustapavaihtoehdon käyttöikätaivoite on 30–50 vuotta. C-korjaustapavaihtoehdossa rakenteisiin tehdään rakennuksen käyttöä ylläpitäviä korjauksia, joissa korjaukset rajautuvat pääasiassa pintarakenteisiin sekä rakenteiden ilmatiiveyden ja kosteusteknisen toiminnan parantamiseen. C-vaihtoehdon käyttöikätaivoitteena on 15–20 vuotta. (Mts. 106–107.)

Opinnäytetyön laskentakohteen peruskorjaus suunniteltiin Ympäristöministeriön oppaan korjaustapavaihtoehdon A mukaisesti. Kokonaan uusittaviksi rakennusosiksi määritettiin rakennuksen alapohjarakenne, ikkunat ja ulko-ovet. Yläpohjiin, ulkoseiniin ja välipohjiin suunniteltiin korjaukset, joissa rakennusosien rakennekerrokset uusittiin kantavaan rakenteeseen saakka. Kevyitä väliseiniä määritettiin korjattavaksi ala- ja välipohjien korjaamisesta johtuen siten, että levyrakenteiset seinät uusittiin metrin korkeuteen lattiapinnasta ja tiiliväliseinät uusittiin kokonaisuudessaan. Kevyiden väliseinien korjauksissa seinien rakennekerrokset suunniteltiin toteutettavan entistä vastavina. Kantaviin väliseiniin ei suunniteltu laajempia korjauksia, kantavista väliseinistä suunniteltiin kuitenkin uusittavaksi pintakäsittelyt/pintarakenteet.

Ympäristöministeriön asetuksen 4/13 (Ympäristöministeriön asetus rakennuksen energiatehokkuuden parantamisesta korjaus- ja muutostöissä) mukaan rakennuksen energiatehokkuutta tulee parantaa rakennus- tai toimenpideluvanvaraisten korjausten yhteydessä. Rakennusosittain energiatehokkuutta tulee parantaa siten, että yläpohjien ja ulkoseinien U-arvoa pienennetään puolella

tai U-arvo vastaa pienimmillään uudisrakentamisen vertailutasoa. Alapohjia tulee korjata mahdollisuuksien mukaan ja uusien ikkunoiden sekä ulko-ovien U-arvot voivat olla enintään $1 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. (A 4/13, 2.) Laskentakohteen yläpohjien ja ulkoseinien U-arvot olivat lähtökohtaisesti niin suuret, että näiden rakennusosien energiatehokkuutta parannettiin puolella. Alapohjat suunniteltiin uusittavaksi kokonaisuudessaan ja myös alapohjien energiatehokkuutta parannettiin alkuperäiseen rakenteeseen verrattuna puolella. Ikkunoille ja ulko-oville ei laskettu erikseen U-arvoja, vaan näiden rakennusosien U-arvoksi määritettiin asetuksen 4/13 määrittämä U-arvon enimmäisarvo $1,0 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Rakennuksen uusiksi ikkunoiksi suunniteltiin 3-lasiset lämpölaselementillä varustetut puu-alumiini -ikkunat ja ulko-oviksi alumiinikehyksiset lasilla varustetut ulko-ovet. Rakennuksen perusmuuriin suunniteltiin korjaus, jossa uusitaan perusmuurin vedeneristys ja perusmuurin vastainen pystysalaojakerros. Perusmuurin uudeksi vedeneristykseksi määritettiin bitumivedeneristys ja pystysalaojakerrokseksi 200 mm salaojasora.

Tilapintojen peruskorjaukseen sisällytettiin rakennuksen kaikkien tilapintojen uusiminen. Kuivien tilojen seinien pintakäsittelyksi määritettiin kaksinkertainen maalaus. Kuivien tilojen lattiapinnoiksi määritettiin vinyylilaatoitus sekä keraaminen laatoitus siten, että puolet rakennuksen lattiapinta-alasta on laatoitettu vinyylillä ja puolet keraamisella laattalla. Lattiapintojen alle suunniteltiin matala-alkalinen lattiatasoite. Märkätilojen pintarakenteiksi määritettiin keraaminen laatoitus ja massamainen vedeneriste, märkätilojen lattia suunniteltiin tasoitettavaksi matala-alkalisella tasoitteella. Kattopinnat suunniteltiin kauttaaltaan maalattaviksi, myös alakattorakenteiden osalta, sillä alakattorakenteen yläpuoliset kattopinnat maalaamalla voidaan vähentää mahdollista sementtipölyn kulkeutumista sisäilmaan. Näkyviin kattopintoihin tuli kaksinkertainen maalipinta ja alakattojen yläpuolisille osille sekä kattoon liimattavien akustovillalevytysten taustalle yksi pohjamaalikerros. Alakattorakenteita määritettiin asennettavaksi käytäville sekä märkätiloihin, alakattorakenteita käytetään tyypillisesti vähintään käytävien osalla talotekniikan vetojen verhoamiseksi. Opetustilojen ja muiden suurten tilojen kuten esimerkiksi ruokalan kattoon suunniteltiin asennettavaksi liimalla kiinnitettävä akustiikkavillalevytys.

Talotekniikka suunniteltiin uusittavaksi laskentakohteen peruskorjauksessa lopulta kokonaisuudessaan, sillä laskentakohteelle ei ollut käytettävissä lvis-suunnitelmia ja toisaalta talotekniikan osuus peruskorjauksen hiilijalanjäljestä oli lähtökohtaisesti suunnitelmissa laskea yksinkertaistetulla taulukkoarvoihin perustavalla menetelmällä. Käytännössä taloteknisissä järjestelmissä on osia, joiden

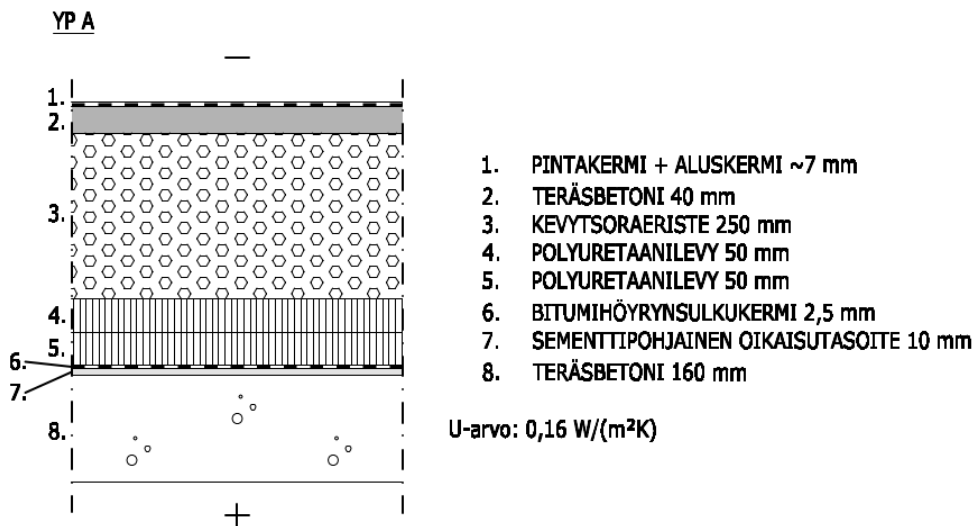
uusiminen ei olisi osien teknisen käyttöiän puolesta välttämätöntä, kuten esimerkiksi ilmanvaihtokanaviston osalla, jossa ei esiinny vastaavaa kulumista kuin esimerkiksi vesijohtojen, viemäreiden tai muiden talotekniikan järjestelmien osalla (RT 18-10922 2008, 24). Toki peruskorjattaessa rakennusta pitkää vähintään 50 vuoden käyttöikää tavoitellen, on talotekniikan uusiminen kokonaisuudessaan arviolta hyvin perusteltavissa, sillä rakenteet puretaan pitkälti runkorakenteisiin asti tai uusitaan kokonaisuudessaan, minkä myötä taloteknisten järjestelmien uusiminen helpottuu merkittävästi.

6.2.2 Korjatut rakennetyypit

Yläpohja- ja vesikattorakenteen korjaus

Laskentakohteen yläpohjan korjauksen suunnittelussa lähdettiin liikkeelle siitä, että rakennetyyppi pysyisi pitkälti alkuperäisen kaltaisena mutta rakenteen U-arvoa pienennettäisiin puolella rakenteen alkuperäiseen U-arvoon verrattuna. Yläpohjan korjauksessa vanhat rakennekerrokset suunniteltiin purettavaksi yläpohjan kantavaan betonilaatta asti. Eristävyyden parantamiseksi rakenteessa päätettiin käyttää alimpina eristekerroksina polyuretaanilevyä, sillä polyuretaanilevyn pienen lämmönjohtavuuden myötä rakenteen paksuutta ei tarvitsi kasvattaa merkittävästi. Polyuretaanilevyä käyttämällä rakenteen kevytsoraeristeen paksuutta voitiin myös hieman pienentää alkuperäiseen rakenteeseen verrattuna, mikä arviolta pienentää mahdollisuutta eristekerroksen sisäisen luonnollisen konvektion esiintymiselle ja siitä seuraavalle rakenteen lämmöneristävyyden heikkenemiselle.

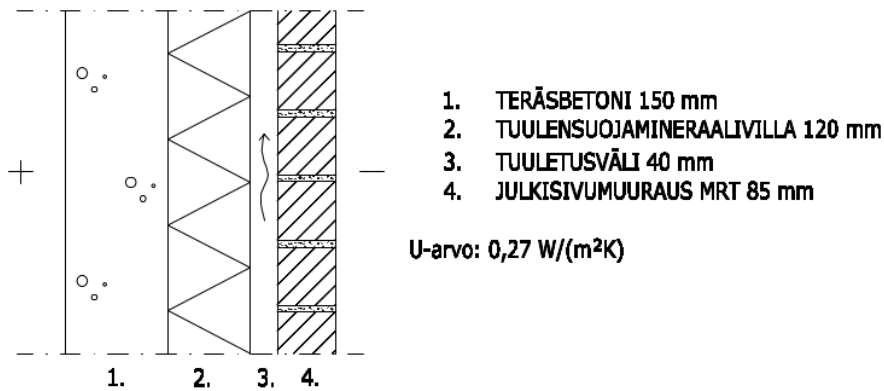
Polyuretaanieristelevy on koostumukseltaan jäykkää, mistä johtuen se on suositeltavaa asentaa tasaisen alustan päälle. Polyuretaanilevyn tiiviin asennuksen varmistamiseksi kantavan yläpohjan betonilaatan pintaan suunniteltiin ohut tasoitekerros. Tasoitekerroksen päälle määritettiin asennettavaksi bitumihöyrinsulku ja rakenteen lämmöneristys (polyuretaani ja kevytsora). Lämmöneristyksen päälle lisättiin vesikatteen alustana toimiva ohut teräbetonilaatta ja vesikatteeksi kaksinkertainen bitumikermi. Korjatun yläpohjarakenteen U-arvoksi saatiin DOF-Lämpö -ohjelmalla $0,16 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Korjatun yläpohjarakenteen rakennetyyppi on esitetty tarkemmin kuviossa 21.



Kuvio 21. Yläpohjan korjattu rakennetyyppi.

Ulkoseinän korjaus

Ulkoseinän korjauksessa rakenteesta suunniteltiin purettavaksi kaikki rakennekerrokset aina kantavaan sisäpuoliseen teräsbetonikuoreen asti. Ympäristöministeriön asetuksen 4/13 mukaisesti ulkoseinän energiatehokkuutta tuli parantaa puolella alkuperäiseen rakennetyyppiin verrattuna ja tämä toteutettiin rakenteen lämmöneristyksen paksuutta kasvattamalla. Uudeksi lämmöneristeeksi määritettiin 120 mm tuulensuojamineraalivilla Paroc Cortex One. Tuulensuojamineraalivilla on jäykkää ja sen tiivis asentaminen teräsbetonisisäkuoren pintaan voi edellyttää sisäkuoren ulkopinnan tasoittamista, tässä työssä sisäkuoren pinta oletettiin kuitenkin riittävän suoraksi, eikä sisäkuoren ulkopintaan lisätty tasoitekerrosta. Alkuperäisen sandwich-ulkoseinän tuulettuvuus oli arviolta heikkoa, mikä voi johtaa ulkoseinän lämmöneristeen kosteus- ja mikrobivaurioitumiseen. Kosteusongelmien ehkäisemiseksi ulkoseinän uudeksi julkisivuverhoukseksi suunniteltiin taustaltaan hyvin tuulettuva tiiliverhous. Ulkoseinän korjattu rakennetyyppi on esitetty tarkemmin kuviossa 22.

US A

Kuvio 22. Ulkoseinän korjattu rakennetyyppi.

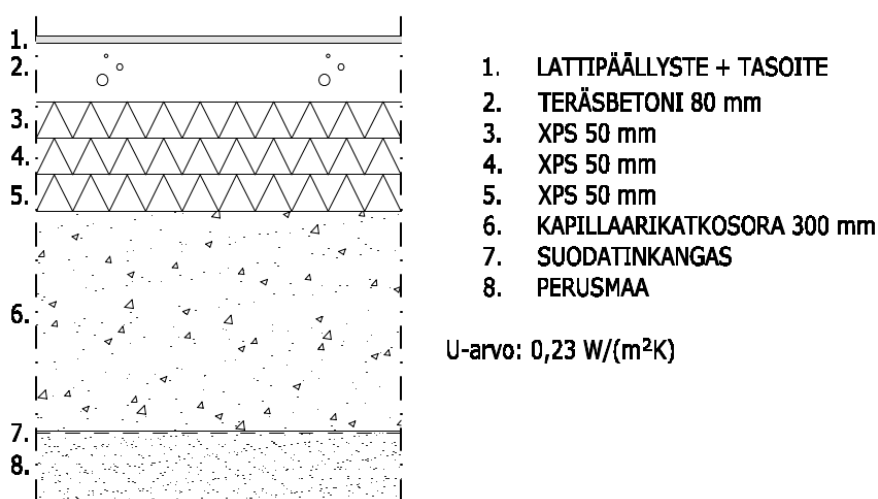
Korjatun ulkoseinän rakennetyypin U-arvon laskennassa huomioitiin tiiliverhouksen taustan hyvä tuulettuminen siten, että rakenteen lämmönvastuksen laskennassa ei huomioitu ilmakerroksen eikä tiiliverhouksen lämmönvastusta, vaan rakennekerrosten lämmönvastukset laskettiin teräsbetonisäkuoren ja tuulensuojamineraalivillan osalta. Lisäksi ulkopinnan pintavastuksena voitiin käyttää sisäpinnan pintavastusta $0,13 \text{ m}^2\text{K/W}$. Tiilimuurauksen kiinnityksestä teräsbetoniseen sisäkuoreen aiheutuu rakenteeseen pistemäisiä kylmäsiltoja, mistä johtuen rakenteelle tuli laskea korjattu lämmönläpäisykerroin U_c . Tiilimuurauksen muuraussiteiksi määritettiin teräksiset halkaisijaltaan 4 mm muuraussiteet ja siteiden määräksi 4 kpl/m^2 . Muuraussiteiden määrittämisen jälkeen rakenteelle voitiin laskea DOF-Lämpö -ohjelmalla U-arvon korjaustekijä ΔU_f ja korjatuksi lämmönläpäisykertoimeksi U_c saatiin lopulta $0,27 \text{ W/(m}^2\text{K)}$.

Alapohjan korjaus

Laskentakohteen alapohjarakenteet suunniteltiin uusittaviksi kokonaan Kosteus- ja mikrobivaurioituneiden rakennusten korjaus -julkaisun korjaustapavaihtoehdon A mukaisesti. Alapohjakorjauksen suunnittelussa rakenteen energiatehokkuuden parantamisen lähtökohdaksi otettiin rakenteen U-arvon puolittaminen alkuperäisen alapohjan U-arvoon verrattuna. Uusi alapohjarakenne olisi sinänsä ollut mahdollista suunnitella energiatehokkuudeltaan uudisrakennuksen alapohjan vertailuarvoa vastaavaksi ($U\text{-arvo} = 0,16 \text{ W/(m}^2\text{K)}$) mutta rakennuksen peruskorjauksen hiilijalanjäljen tarkastelun lähtökohdaksi määritettiin alun perin, että yläpohjien, ulkoseinien ja alapohjien energiatehokkuutta parannetaan enintään puolella alkuperäisestä U-arvosta.

Uusi alapohjarakenne suunniteltiin tyypilliseksi uudisrakennuksen maanvaraiseksi alapohjaksi, jossa perusmaan päälle asennetaan suodatinkangas, kankaan päälle kapillaarikatkokerros, lämmöneristeet ja teräsbetoni-laatta. Teräsbetoni-laatan pinta määritettiin tasoitettavaksi ohuella matala-alkalisella tasoitekerroksella ennen lattiapäällysteiden/pintarakenteiden asentamista. Rakenteen lämmöneristeinä käytettiin suulakepuristettua polystyreeniä (XPS). XPS-eristeen lämmönjohtavuus on alkuperäisen rakenteen kevytsoraeristettä merkittävästi pienempi ja tästä johtuen rakenteen U-arvon puolittaminen onnistui rakennetyypin paksuutta juurikaan muuttamatta. Uuden alapohjarakenteen U-arvo laskettiin alkuperäisen alapohjarakenteen tapaan yksinkertaistetulla menetelmällä, jossa alustäytön lämmönvastus huomioidaan pienentämällä rakenteen U-arvoa 10 %. U-arvoksi ilman alustäytön lämmönvastusta saatiin DOF-Lämpö -ohjelmalla 0,25 W/(m²K) ja alustäytön lämmönvastus huomioiden 0,23 W/(m²K). Uuden alapohjan rakennetyyppi on esitetty kuviossa 23.

AP A

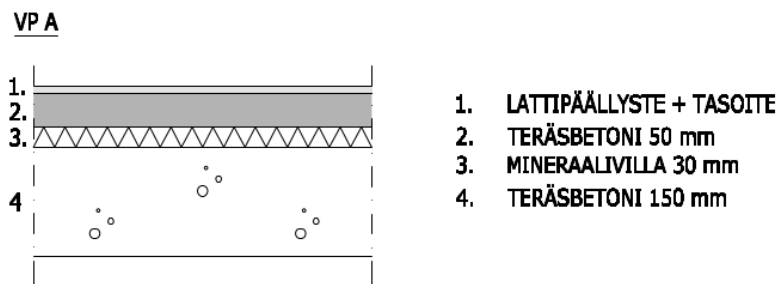


Kuvio 23. Alapohjan korjattu rakennetyyppi.

Välipohjan korjaus

Välipohjan korjauksessa välipohjan rakennetyyppi säilytettiin pääasiassa alkuperäistä rakennetta vastaavana. Välipohjasta suunniteltiin uusittavaksi kaikki rakennekerrokset kantavan betonilaatan yläpintaan asti, sillä vanhoissa kerroksellisissa välipohjarakenteissa voi esiintyä kosteus- ja mikrobivaurioita erityisesti betonilaattojen välisessä ääneneristekerroksessa. Ääneneristekerrokset ovat

rakentamisaikana tyypillisesti kastuneet rakennuskosteuden vaikutuksesta ja myöhemmin mahdollisten vesivahinkojen myötä. Edellä mainitut rakennekerrokset purkamalla parannetaan myös rakenneliittymien tiivistyskorjausten toteutettavuutta koska tiivistykset voidaan tehdä kantavien rakenteiden pintaan. Uudeksi askeläänieristeeksi määritettiin 30 mm mineraalivilla ja villan päälle 50 mm teräsbetoni-laatta. Välipohjan rakennetyyppi on esitetty tarkemmin kuviossa 24.



Kuvio 24. Välipohjan korjattu rakennetyyppi.

6.3 Hiilijalanjäljen laskeminen

Laskentakohteen geometrian ja peruskorjauksen laajuuden sekä korjaustapojen määrittämisen jälkeen laskettiin rakennuksen peruskorjauksen hiilijalanjälki. Peruskorjauksen hiilijalanjäljen laskenta tehtiin Ympäristöministeriön vuonna 2019 julkaisemalla rakennuksen vähähiilisyyden arviointimenetelmällä (myöhemmin vähähiilisyyden arviointimenetelmä). Opinnäytetyön suunnitteluvaiheessa laskentaan suunniteltiin käytettävän Ympäristöministeriön valmista Excel-pohjaista laskentatyökalua mutta laskentaa tehtäessä todettiin, että laskentatyökalusta ei löydy riittävästi sopivia rakennustuotteita ja toisaalta laskentatyökalun arvoja ei pystynyt muokkaamaan tarpeeksi. Näin ollen hiilijalanjäljen laskenta tehtiin alusta alkaen itse Excel-taulukkolaskentaohjelmalla.

Hiilijalanjälkilaskennan alkuun tehtiin muutamia rajoituksia laskennan toteutuksen osalle. Laskennan tarkastelujakson pituudeksi määritettiin 50 vuotta, pitkän tarkastelujakson myötä laskennan tulosta voitiin vertailla paremmin vastaavan käyttötarkoituksen uudisrakennukseen. Vuoden 2019 Vähähiilisyyden arviointimenetelmästä poiketen laskentaan sisällytettiin myös pintakäsittelyiden hiilijalanjälki. Rakennukseen ei suunniteltu peruskorjauksen yhteydessä toteutettavia rakennuksen

laajennuksia tai tilamuutoksia, vaan peruskorjauksen ajatuksena oli korjata tai uusia olemassa olevat rakenteet ja järjestelmät luvussa 6.2 esitetyn mukaisesti. Talotekniikan osalta määritettiin, että rakennus on liitetty kaukolämpöverkkoon ja lämmönjakojärjestelmänä toimii vesikiertoinen patterilämmitys. Rakennuksen ilmanvaihtojärjestelmäksi määritettiin koneellinen tulo- ja poistoilmanvaihto lämmöntalteenottojärjestelmällä varustettuna. Lämmöntalteenoton vuosihyötysuhteena käytettiin rakennuksen energiatehokkuuden parantamista koskevassa asetuksessa esitettyä vuosihyötysuhteen vähimmäistasoa 45 % (A 4/13, 2). Laskentaa varten määritettyjä rakennuksen ominaisuustietoja on esitetty kootusti alla olevassa taulukossa 4.

Taulukko 4. Rakennuksen ominaisuustietotaulukko hiilijalanjäljen laskentaa varten.

Rakennusluokka	08 Opetusrakennukset
Runkomateriaali	Betoni
Kerroslukumäärä	2
Lämmitettävä nettoala	2 416 m ²
Rakennustilavuus	8 393 m ³
Ilmanvaihtojärjestelmä	Koneellinen tulo- ja poistoilmanvaihto
LTO:n vuosihyötysuhde	45 %
Lämmitysmuoto	Kaukolämpö
Lämmönjakotapa	Vesikiertoinen patterilämmitys

6.3.1 Tuotevaiheen hiilijalanjälki A1–A3

Tuotevaiheen hiilijalanjäljen laskeminen aloitettiin määrälaskennasta. Hiilijalanjäljen laskennassa määrälaskennan tavoitteena on laskea uusien materiaalien määrätiedot hiilijalanjäljen laskemiseen soveltuvassa yksikössä. Tässä työssä päästötietokantana käytettiin Suomen ympäristökeskuksen ylläpitämää kansallista päästötietokantaa (Rakentamisen päästötietokantaa). Rakentamisen päästötietokanta sisältää tuotteiden, palvelujen ja järjestelmien päästötietoja, jotka ovat yleensä ilmoitettu hiilidioksidiekvivalenttikiloina materiaalin painokiloa tai pinta-alaa kohden, päästötietojen yksikköinä käytetään siten kgCO₂e/kg tai kgCO₂e/m². Painokiloa kohden esitetyn päästötiedon käyttäminen edellyttää, että määrälaskennassa lasketaan materiaalien tilavuudet tai pinta-alat, ja määrätiedot muutetaan painokiloiksi materiaalien muunnoskertoimien, kuten tilavuuspainon [kg/m³] tai neliömassan [kg/m²] avulla. Yksittäisille rakennusosille muunnoskertoimia on saatavilla

myös kappalekohtaisesti, tällöin muunnoskertoimen yksikkönä on kg/kpl. Kappalekohtaisia muunnoskertoimia käytettiin laskennassa mahdollisuuksien mukaan, sillä kappalekohtaisten muunnoskertoimien käyttäminen nopeutti laskentaa merkittävästi, kun rakennusosasta ei tarvinnut laskea määrätietoja rakennekerros kerrallaan. Rakentamisen päästötietokannassa kappalekohtaisia muunnoskertoimia oli tosin saatavilla melko rajatusti, tässä työssä kertoimia voitiin hyödyntää ikkunoiden ja ovien päästölaskennassa.

Palvelujen ja järjestelmien päästötietoja on Rakentamisen päästötietokannassa ilmoitettu myös valmiina taulukkoarvoina rakennuksen pinta-alaa kohden tai palvelun kannalta muussa relevantissa yksikössä, kuten esimerkiksi lämmityksen osalla kgCO₂e/kWh. Päästötietokannassa on esitetty lisäksi tuotteiden, palveluiden ja järjestelmien muita päästölaskennassa hyödynnettäviä tietoja, kuten materiaalihukkakertoimia, jätteenkäsittelytietoja ja muunnoskertoimia. Kuviossa 25 on esitetty Rakentamisen päästötietokannan näkymä yksittäisen laskennassa käytetyn rakennusmateriaalin osalta.

Version 1.00.008, 2022-12-06

XPS-insulation	3.1 kg CO ₂ e /kg
XPS-eriste	KONSERVATIIVINEN ARVO RAKENTAMISLUVAN HAKEMISEEN, GWP (A1-A3)
XPS-isolering	

LISÄÄ LUETTELOON

Ympäristöindikaattorit		
TYYPILLINEN ARVO, GWP (A1-A3) Ei käytetiä rakentamislupaa haettaessa	2.6 kg CO ₂ e /kg	
KONSERVATIIVISEN ARVON KERROIN	1.2	
HIILIKÄDENJÄLKI	D1 Re-use and material recycling D2 Energy recovery D4 Carbon storage effect D5 Carbonation	
HUKKAKERROIN Hukka rakennustyömaalla	1.03	
UUSIUTUVIEN MATERIAALIEN OSUUS (%)	-	
KIERRÄTYSMATERIAALIEN OSUUS (%)	-	
HAITALLISTEN AINEIDEN OSUUS (%), (SVHC)	<0.1 %	
ELINKAAREN JÄLKEINEN SKENAARIO (%)	Reuse Recycled as secondary rawmaterial Energy recovery Final disposal Hazardous waste to be removed from use	0 % 0 % 100 % 0 % 0 %
MUUNNOSKERROIN	Density, kg/m ³	32

Kuvio 25. XPS-eristeen päästötietojen näkymä Rakentamisen päästötietokannassa (Rakentamisen päästötietokanta 2022).

Rakentamisen päästötietokannassa rakennustuotteiden päästötietoja on saatavilla melko kattavasti. Tietokannasta ei löydetty kuitenkaan kaikkien laskentakohteen peruskorjaukseen sisällytetyjen materiaalien tietoja, päästötiedot puuttuivat yläpohjaan suunnitellun polyuretaanieristeen ja märkätilojen massamaisen vedeneristeen osalta. Näiden materiaalien osalta käytettävä tuote määritettiin tarkemmin, yläpohjan polyuretaanieristeeksi määritettiin Kingspanin valmistama Therma TR26 Tasakattoeriste ja märkätilojen vedeneristeeksi Weberin valmistama Weber WX -vedeneriste. Päästötietoina käytettiin Kingspanin ja Weberin ympäristöselosteissa (EPD) esitettyjä tietoja.

Vähähiilisyyden arviointimenetelmän mukaan korjausrakennushankkeissa materiaalien päästöt tulee laskea uusittavien tai korjattavien rakennusosien ja materiaalien osalta. Tuotevaiheen hiilijalanjälkeen ei näin ollen lasketa mukaan rakennuksen kuluneen elinkaaren vaiheita (Rakennuksen vähähiilisyyden arviointimenetelmä 2019, 17). Laskentakohteen määrätiedot laskettiin menetelmäohjeen mukaisesti korjattavien rakennusosien uusien rakennekerrosten osalta. Ylä- ja välipohjarakenteiden sekä ulkoseinien osalla vähähiilisyyden arviointimenetelmän mukainen määrälaskenta tarkoitti käytännössä rakennekerrosten määrien laskemista kantavaa rakennetta lukuun ottamatta kaikista rakennetyyppien rakennekerroksista. Alapohjan laskenta poikkesi muiden rakennusosien määrälaskennasta koska alapohja suunniteltiin uusittavaksi kokonaan, mistä johtuen alapohjan rakennekerrokset tuli laskea alapohjan kaikkien rakennekerrosten osalta. Määrätietojen laskennassa hyödynnettiin laskentakohteen määrittämisen yhteydessä AutoCAD-ohjelmalla piirrettyjä rakennuksen pohja- ja leikkauskuvia ja AutoCAD-ohjelman määrälaskennan komentoja.

Vähähiilisyyden arviointimenetelmän mukaan määrälaskennassa tulee huomioida työmaalla syntävä materiaalihukka. Laskentakohteen määrälaskennassa materiaalihukka huomioitiin Rakentamisen päästötietokannan hukkakertoimien avulla, käyttämällä kullekin laskettavalle materiaalille päästötietokannassa esitettyä materiaalille ominaista hukkakerrointa. Laskentakohteen peruskorjaukseen suunniteltujen materiaalien hukka vaihteli päästötietokannan mukaan välillä 3–10 % ja hukkakertoimina käytettiin kertoimia 1,03; 1,05 ja 1,10.

Määrälaskennan, materiaalien päästötietojen ja materiaalihukan määrittämisen jälkeen rakenteiden hiilijalanjälki laskettiin kertomalla materiaalien määrätiedot päästökertoimilla. Alla olevassa taulukossa 5 on esitetty yläpohjarakenteen tuotevaiheen A1–A3 hiilijalanjäljen laskentataulukko.

Laskelmassa on huomioitavaa, että polyuretaanilevyn päästökerroin on saatu Kingspanin ympäristöselosteesta ja kertoimen yksikkönä on muista materiaaleista poiketen $\text{kgCO}_2\text{e}/\text{m}^2$. Kaikki tuotevaiheen A1–A3 hiilijalanjäljen laskentataulukot on esitetty liitteessä 1.

Taulukko 5. Yläpohjan tuotevaiheen A1–A3 hiilijalanjäljen laskentataulukko.

Rakennusosa	Rakennekerrokset	Materiaalin tiheys [kg/m^3]	Paino rakennekerros [kg]	Pinta-ala koko rakenne [m^2]	Rakennekerroksen tilavuus [m^3]	Rakennekerroksen pinta-ala [m^2]	Materiaalin GWP [$\text{kgCO}_2\text{e}/\text{kg}$]	Rakennekerroksen hiilijalanjälki [kgCO_2e]	Huomioita
1236 Yläpohjat				1264					
	pintakermi + aluskermi 7 mm	1389	12290		8,8		0,67	9058	Hukkakerroin 1,1
	teräsbetoni 40 mm	2275	112724		49,5		0,12	14203	Hukkakerroin 1,05
	betoniteräksiset, 2 % betonista	7850	7938		1,0		0,67	5584	Hukkakerroin 1,05
	kevytsora 250 mm	304	96064		316,0		0,4	40347	Hukkakerroin 1,05
	polyuretaanilevy 100 mm					1264	8,38	10914	Hukkakerroin 1,03
	bitumihöyränsulku	1833	5792		3,2		0,82	4750	Hukkakerroin 1,1
	sementtipohjainen oikaisutasoite	2000	25280		12,6		0,28	7786	Hukkakerroin 1,1
								Rakenteen hiilijalanjälki	92642

Talotekniikan osalta tuotevaiheen A1–A3 hiilijalanjälkilaskenta tehtiin Vähähiilisyyden arviointimenetelmän mukaisella yksinkertaistetulla laskentatavalla, jossa talotekniikan päästötietona käytetään neliömetrikohtaista taulukkoarvoa. Taulukkoarvoja käytettiin, sillä laskentakohteesta ei ollut käytettävissä lvis-suunnitelmia, eikä määrälaskentaa olisi talotekniikan osalta voitu näin ollen tehdä. Talotekniikan päästötietona käytettiin Rakentamisen päästötietokannassa esitettyä ope-tusrakennuksen talotekniikan päästötietoa $61 \text{ kgCO}_2\text{e}/\text{m}^2$. Taulukkoarvoja käytettäessä tulee huomioida, että käytetty arvo tulee jakaa rakennuksen suunnitellulle käyttöiälle, laskentakohteen suunniteltu käyttöikä on 50 vuotta, joten talotekniikan päästötieto jaettiin 50:llä ja tulokseksi saatiin $1,22 \text{ kgCO}_2\text{e}/\text{m}^2/\text{a}$.

6.3.2 Rakentamisvaiheen hiilijalanjälki A4–A5

Rakentamisvaiheen hiilijalanjälki A4–A5 sisältää työmaatoiminnasta ja rakentamisvaiheen kuljetuksista aiheutuvan hiilijalanjäljen. Vähähiilisyyden arviointimenetelmän mukaan rakentamisvaiheen hiilijalanjälki voidaan joko arvioida yksinkertaistetulla taulukkoarvoihin perustuvalla menetelmällä tai vaihtoehtoisesti hiilijalanjälki lasketaan tarkemmin rakennuksen elinkaaren eri vaiheissa. Tarkka laskeminen edellyttää, että kuljetusten ja työmaan hiilijalanjäljet lasketaan rakentamisvaiheissa A4 ja A5, sisältäen rakentamisen kuljetusten päästöt (vaihe A4) ja rakentamisen työmaan päästöt (vaihe A5), korjausvaiheissa B3–B4 ja elinkaaren lopussa purku- ja jätteenkäsittelyvaiheissa C1–C4.

Kuljetusten hiilijalanjäljen laskennassa tulee menetelmäohjeen mukaan laskea jokaisen kuljetuksen päästöt erikseen huomioiden kunkin kuljetuksen kuljetustapa ja kuljettamiseen käytettävä polttoaine päästökertoimineen. Kuljetusten päästöt tulee laskea kaikille rakennukseen asennettaville materiaaleille ja lisäksi työmaalla syntyvä rakennusjätteen kuljetukset. Työmaan hiilijalanjäljen laskennassa tarkastellaan puolestaan työmaatoimintoihin kuluva ostenergiaa ja polttoaineita, ja näiden päästöt voidaan laskea energiamuotojen kertoimien avulla.

Tässä työssä laskentakohteen rakentamisvaiheen A4–A5 hiilijalanjälki arvioitiin Vähähiilisyyden arviointimenetelmän liitteessä 3 ja tämän työn taulukossa 2 esitetyillä taulukkoarvoilla. Taulukkoarvoja käytettiin, sillä taulukkoarvojen käyttö on nähty perustelluksi myös rakennusten peruskorjausten hiilijalanjälkeä tarkastelevassa tutkimuskirjallisuudessa mm. Ympäristöministeriön rahoittamassa Huuhkan ja muiden (2021, 14) tekemässä tutkimuksessa. Lisäksi rakentamisvaiheen hiilijalanjäljen vaikutus rakennuksen koko elinkaaren hiilijalanjälkeen arvioitiin taulukkoarvojen perusteella olevan melko pientä; kuljetuksista aiheutuva hiilijalanjälki $A4 = 10,20 \text{ kgCO}_2\text{e/m}^2$ ja työmaatoiminnoista aiheutuva hiilijalanjälki $A5 = 27,30 \text{ kgCO}_2\text{e/m}^2$. Tässä työssä tarkasteltavan peruskorjattavan opetusrakennuksen käyttöiäksi määritettiin 50 vuotta, joten rakentamisvaiheen A4–A5 hiilijalanjäljeksi muodostui yhteensä $0,75 \text{ kgCO}_2\text{e/m}^2/\text{a}$. Hiilijalanjälki laskettiin seuraavasti:

$$\text{Hiilijalanjälki A4–A5: } (10,20 + 27,30) \text{ kgCO}_2\text{e/m}^2 \div 50 = 0,75 \text{ kgCO}_2\text{e/m}^2$$

6.3.3 Käytönaikaisten korjausten ja osien vaihdon hiilijalanjälki B3–B4

Käytönaikaisten korjausten ja osien vaihdon hiilijalanjälkeen sisällytetään Vähähiilisyyden arviointimenetelmän mukaan rakennukseen vaihdettavien uusien materiaalien ja osien tuote- ja rakentamisvaiheen päästöt. Hiilijalanjäljen arvioimiseksi tulee määrittää rakennuksen elinkaaren aikana vaihdettavat materiaalit ja osat, vaihtotarve riippuu rakennuksessa käytettyjen tuotteiden teknisestä käyttöiästä, rasitusluokasta ja rakennuksen suunnitellusta elinkaaresta. Tuotteiden käyttöiän (vaihtovälin) määrittämisessä voidaan hyödyntää Rakentamisen päästötietokannassa tai RT-kortissa 18-10922 (Kiinteistön tekniset käyttöiät ja kunnossapitajakset) esitettyjä osien ja järjestelmien käyttöikäoletuksia, tai vaihtovälit lasketaan tässä työssä esitetyllä kaavalla 1.

Laskentakohteen materiaalien vaihtovälin arvioimiseen käytettiin RT-korttia 18-10922. Vaihtovälin arvioimiseksi materiaaleille ja rakennusosille tuli määrittää rasitusluokat, joita on RT-kortissa esitetty kolmea eri tasoa: kevyt, normaali ja vaikea rasitusluokka. Rasitusluokat kuvaavat materiaaliin tai rakennusosaan ympäristöstä ja käytöstä aiheutuvia rasitusolosuhteita. Laskentakohteen kaikkien materiaalien ja rakennusosien rasitusluokaksi määritettiin rasitusluokka 2 (normaali). Vaihtovälien arvioinnin perusteella laskentakohteen rakenteista tuli 50 vuoden elinkaaren aikana uusia vedeneristysmateriaaleja ja tilapintoja, joissa molemmissa materiaalien keskimääräiset käyttöiät ovat RT-kortin mukaisesti pääosin noin 30 vuotta ja materiaalit tuli siten uusia kertaalleen. Maalattujen pintojen osalta käyttöikä on 20 vuotta, mistä johtuen laskentakohteen seinä- ja kattopintojen maalauskesittelyt tuli uusia käyttöiän aikana kahdesti.

Vaihtovälien määrittämisen myötä korjauksia ja osien vaihtoja kohdistui laskentakohteen perusmuuriin, yläpohjaan ja tilapintoihin. Perusmuurissa ja yläpohjassa uusittaviksi materiaaleiksi määritettiin bitumikermivedeneristeet, perusmuurin osalla laskettiin uusittavaksi myös bitumikermieristeen vastainen pystysalaojituskerros. Tilapintojen osalta uusittavaksi materiaaleiksi määritettiin märkätilojen seinien ja lattioiden massavedeneristeet, joiden uusiminen edellyttää käytännössä myös märkätilojen keraamisten laatoitusten uusimista. Kuivien tilojen osalla uusittaviksi materiaaleiksi määräytyi maalipinnat ja lattian vinyylilaatoitus. Lattioiden keraamisten laatoitusten ja vinyylilaatoitusten uusimiseen laskettiin mukaan myös lattiatasoitteen uusiminen materiaalien vaihdon yhteydessä. Alla olevassa taulukossa 6 on esitetty yläpohjarakenteen käytönaikaisen korjauksen ja osien vaihdon tuotevaiheen hiilijalanjäljen laskentataulukko. Kaikki käytönaikaisten korjausten ja osien vaihdon laskentataulukot on esitetty liitteessä 1.

Taulukko 6. Yläpohjan korjausten ja osien vaihdon B3–B4 hiilijalanjäljen laskentataulukko.

Rakennusosa	Rakennekerrokset	Materiaalin tiheys [kg/m ³]	Paino rakennekerros [kg]	Pinta-ala koko rakenne [m ²]	Rakennekerroksen tilavuus [m ³]	Rakennekerroksen pinta-ala [m ²]	Materiaalin GWP [kgCO ₂ e/kg]	Rakennekerroksen hiilijalanjälki [kgCO ₂ e]	Huomioita
1236 Yläpohjat	pintakermi + aluskermi 7 mm	1389	12290	1264	8,8		0,67	9058	Hukkakerroin 1,1
								Rakenteen hiilijalanjälki	9058

Talotekniikan osalta korjausten ja osien vaihdon hiilijalanjäljen arvioinnissa käytettiin Rakentamisen päästötietokannassa esitettyä opetusrakennuksen talotekniikan taulukkoarvoa. Päästötietokannan mukaan talotekniikan korjauksista ja osien vaihdosta aiheutuva hiilijalanjälki on 32 kgCO₂e/m². Rakennuksen 50 vuoden käyttöiälle jaettuna hiilijalanjäljeksi saatiin 0,64 kgCO₂e/m²/a.

Korjausten ja osien vaihdon hiilijalanjäljessä tulee Vähähiilisyyden arviointimenetelmän mukaan huomioida myös korjauksiin käytetyn ostoenergian sekä polttoaineiden päästöt. Korjausten energiankulutuksen voi laskea vaihe kerrallaan tarkemmin tai käyttää arviointiin taulukkoarvoa. Laskentakohteen korjausten energiankulutukseen käytettiin Vähähiilisyyden arviointimenetelmän liitteen 3 taulukkoarvoa $2,16 \text{ kgCO}_2\text{e/m}^2$. 50 vuoden käyttöiälle jaettuna hiilijalanjäljeksi saatiin $0,04 \text{ kgCO}_2\text{e/m}^2/\text{a}$.

6.3.4 Energian käytön hiilijalanjälki B6

Rakennuksen käytön aikaisesta energiankulutuksesta aiheutuvan hiilijalanjäljen laskemiseksi laskentakohteelle tuli ensiksi laskea rakennuksen vuotuinen ostoenergiankulutus. Vähähiilisyyden arviointimenetelmän mukaan vuotuinen ostoenergiankulutus tulee laskea asetusta 1010/2017 (Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen energiatehokkuudesta) noudattaen sisällyttäen laskentaan asetuksessa määritetyt rakennuksen tekniset järjestelmät. Laskentakohteen vuotuinen ostoenergiankulutus laskettiin D.O.F tech Oy:n ja Saint-Gobain Finland Oy:n tarjoamalla energialaskentaohjelmalla. Energialaskentaohjelma on saatavilla Laskentapalvelut.fi -sivustolta, jossa on tarjolla myös muita rakennusalan laskentasovelluksia mm. rakenteiden kosteus- ja lämpöteknisen toiminnan tarkasteluun, rakenteiden lujuus- ja ääneneristävyytlaskentaan sekä rakennuksen energiatehokkuuden määrittämiseen.

Laskettaessa ostoenergiankulutusta energialaskentaohjelmalla, rakennuksesta tulee tietää vähintään seuraavat perustiedot: rakennuksen käyttötarkoitus, sijaintipaikkakunta, ulkovaipan rakennusosien U-arvot ja rakennusosien pinta-alat, rakennuksen lämmitysmuoto, lämmönjakotapa ja ilmanvaihtojärjestelmän tiedot. Laskentakohteen käyttötarkoitukseksi ohjelmaan määritettiin opetusrakennus ja sijaintipaikkakunnaksi Helsinki. Ulkovaipan rakennusosien U-arvoina käytettiin luvussa 6.2 laskettuja korjattujen rakennetyyppien U-arvoja ja pinta-alat laskettiin rakennuksen geometrian ja rakennetyyppien määrittämisen yhteydessä tehdyistä pohja- ja leikkauskuvista.

Ikkunoiden osalle tuli määrittää tarkempi ikkunatyyppi. Ikkunatyypiksi määritettiin matalaemissii-vipinnoitteisella eristyslaselementillä ja erillislasilla varustettu MSE-tyypin ikkuna. Ikkunatyypin määrittäminen vaikuttaa energialaskennassa tarvittavaan g-arvoon, eli ikkunan valoaukon aurin-gon kokonaissäteilyn läpäisykertoimeen.

Rakennuksen vaipan ilmapuotoluvuksi q_{50} määritettiin uudisrakennuksen vertailuarvo $2,0 \text{ m}^3/(\text{hm}^2)$. Oletusarvoisesti ilmapuotolukuna tulisi asetuksen 1010/2017 mukaan käyttää arvoa $4,0 \text{ m}^3/(\text{hm}^2)$, mikäli rakennuksen parempaa ilmatiiveyttä ei todisteta tiiveysmittauksin. Laskentakohteen osalla lähdettiin kuitenkin siitä oletuksesta, että koska rakennus on suunniteltu purettavaksi peruskorjauksen yhteydessä käytännössä kantavaan runkoon asti, ilmatiivettä voidaan parantaa tiivistyskorjauksin merkittävästi oletusarvoa $4,0 \text{ m}^3/(\text{hm}^2)$ paremmaksi.

Talotekniikan tietoina käytettiin luvussa 6.3 määritettyjä tietoja, joiden mukaan rakennuksen lämmitysmuotona on kaukolämpö ja lämmönjakotapana vesikiertoinen patterilämmitys, jossa lämpöjohdot kulkevat lämpimien tilojen puolella. Ilmanvaihtojärjestelmäksi määritettiin koneellinen tulo- ja poistoilmanvaihto, joka on varustettu 45 % vuosihyötysuhteen omaavalla lämmöntalteenottojärjestelmällä. Ilmanvaihdon jälkilämmityspatterin ja käyttöveden lämmitystavaksi määritettiin kaukolämmitys. Talotekniikan osalta ostoenergiankulutukseen vaikuttaa merkittävästi talotekniikan suunnitteluarvot mm. suunnitellut tulo- ja poistoilmamäärät. Laskentakohteesta ei ollut olemassa talotekniikan suunnitelmia, mistä johtuen todellisten suunnitteluarvojen sijaan talotekniikan osalla käytettiin laskentaohjelman määrittämiä rakennuksen vakioitun käytön suunnitteluarvoja. Energialaskentaohjelma määrittää vakioitun käytön suunnitteluarvot rakennuksen perustietojen mm. pinta-ala- ja tilavuustietojen sekä käyttötarkoituksen perusteella. Kuviossa 26 on esitetty näkymä rakennusvaipan tietojen täydentämisestä laskentaohjelmaan.

Perustiedot	Rakenneosat	Kylmäsiilat	Ilmanvaihto	Lämmitysjärjestelmä
		Pinta-ala: (m ²)	U-arvo: (W/m ² K)	
	Ulkoseinä ulkoilmaa vasten:	787	0.27	
	Ulkoseinä puoliämpimään tilaan:	0	0.28	
	Massiivipuuseinä ulkoilmaa vasten:	0	0.28	
	Yläpohja ulkoilmaa vasten:	1208	0.16	
	Yläpohja ulkoilmaa vasten:	0	0.22	
	Yläpohja ulkoilmaa vasten:	0	0.22	
	Alapohja (ulkoilmaan rajoittuva):	0	0.22	
	Alapohja (ryömintätilaan rajoittuva):	0	0.4	
	Alapohja (maanvastainen):	1208	0.23	
	Muu maanvastainen rakennusosa:	0	0.36	g-arvo:
	Ikkunat kaakkoon	0	1	0.495
	Ikkunat lounaaseen	149	1	0.495
	Ikkunat koilliseen	138	1	0.495
	Ikkunat luoteeseen	5	1	0.495
	Ikkunat koilliseen	0.0	1.0	0.495
	Ikkunat kaakkoon	0.0	1.0	0.495
	Ikkunat lounaaseen	0.0	1.0	0.495
	Ikkunat luoteeseen	0.0	1.0	0.495
	Kattoikkunat:	0	1	0.55
	Kattovalokuvut:	0.0	1	0.55
	Ulkiovet:	19	1	

Kuvio 26. Rakennetietojen täydentäminen energialaskentaohjelmaan (Laskentapalvelut.fi. n.d).

Energialaskentaan tarvittavien tietojen määrittämisen jälkeen laskentaohjelmalla voitiin laskea rakennuksen vuosittaiset ostoenergiankulutukset energiamuodoittain. Laskentaohjelman mukaan kaukolämpöä kuluu vuodessa 259 696 kWh ja sähköä 126 212 kWh. Vähähiilisyyden arviointimenetelmän mukaan hiilijalanjäljen laskennassa ei kuitenkaan huomioida kuluttajalaitteiden sähkönkulutusta, laskentaohjelman mukaan kuluttajalaitteiden vuotuinen sähkönkulutus laskentakohteessa on 24 188 kWh. Näin ollen hiilijalanjäljen laskennassa huomioitava sähkönkulutus saatiin vähentämällä kuluttajalaitteiden sähkönkulutus rakennuksen vuotuisesta kokonaissähkönkulutuksesta 126 212 kWh ja tulokseksi saatiin 102 024 kWh/vuosi. Kuviossa 27 on esitetty ote laskenta-kohteen energiatodistuksesta.

YHTEENVETO RAKENNUKSEN ENERGIAITEHOKKUUDESTA

Laskettu kokonaisenergiakulutus ja ostoenergiakulutus

Lämmitetty nettoala, m²

Lämmitysjärjestelmän kuvaus

Ilmanvaihtojärjestelmän kuvaus

2416

Kaukolämpö / Kaukolämpö

LTO-kone asetuksen 2013 vertailuarvoilla, LTO=45, SFP=2.0 (4 kpl)

Käytettävä energiamuoto	Laskettu ostoenergia		Energiamuodon kerroin	Energiamuodon kertoimella painotettu energia
	kWh/vuosi	kWh/(m² vuosi)		kWhE/(m² vuosi)
Sähkö	126212	52	1.70	88.8
Kaukolämpö	259696	107	0.70	75.2
Sähkön kulutukseen sisältyvä valaistus- ja kuluttajalaitesähkö	78617	32.5		
Kokonaisenergiakulutus (E-luku)				165

Rakennuksen energiatehokkuusluokka

Käytetty E-luvun luokittelustaieikko

Luokkien rajat asteikolla

Opetusrakennukset ja päiväkodit

A: ...90

D: 171 ... 230

G: 361 ...

B: 91 ... 130

E: 231 ... 300

C: 131 ... 170

F: 301 ... 360

Tämän rakennuksen energiatehokkuusluokka

C

E-luku perustuu rakennuksen laskennallisiin kulutuksiin ja energiamuotojen kertoimiin. Kulutus on laskettu standardikäytöllä lämmitettyä nettoalaa kohden, jolloin eri rakennusten E-luvut ovat keskenään vertailukelpoisia. E-lukuun sisältyy rakennuksen lämmitys-, ilmanvaihto-, jäähdytysjärjestelmien sekä kuluttajalaitteiden ja valaistuksen energiakulutus. Rakennuksen ulkopuoliset kulutukset kuten autolämmityspistokkeet, sulanapitolämmitykset ja ulkovalot eivät sisälly E-lukuun.

Kuvio 27. Laskentakohteen energiatodistuksen yhteenvetosivu.

Opinnäytetyön yhtenä tavoitteena oli selvittää minkä rakennusosien korjaaminen nostaa merkittävimmin rakennuksen peruskorjauksen hiilijalanjälkeä. Peruskorjauksen jälkeen rakennusosat vaikuttavat laskentakohteen hiilijalanjälkeen erityisesti käytön aikaisen energiankulutuksen kautta, joten rakennusosien käytön aikaisen energiankulutuksen selvittämiseksi rakennusosille tuli laskea johtumislämpöhäviöt. Johtumislämpöhäviöiden laskenta tehtiin Ympäristöministeriön oppaan ”Energiatehokkuus – Rakennuksen energiankulutuksen ja lämmitystehotarpeen laskenta” mukaisesti. Oppaan mukaan rakennusosan johtumislämpöhäviö lasketaan alla esitetyllä kaavalla 2 (Energiatehokkuus 2017, 18).

$$Q_{rakosa} = \sum U_i A_i (T_s - T_u) \Delta t / 1000 \quad (2)$$

jossa

Q_{rakosa} = johtumislämpöhäviö rakennusosan läpi, [kWh]

U_i = rakennusosan lämmönläpäisykerroin, [W/m²K]

A_i = rakennusosan pinta-ala, [m²]

T_s = sisäilman lämpötila, [°C]

T_u = ulkoilman lämpötila, [°C]

Δt = ajanjakson pituus, [h]

1000 = laatumuunnos kilowattitunneiksi.

Laskentakohde sijaitsee Helsingissä, joten ulkoilman lämpötilan arvoina käytettiin säävyöhykkeen I ulkoilman kuukausittaisia keskilämpötilatietoja. Lämpöhäviöiden laskenta tehtiin jokaiselle rakennusosalle kuukausikohtaisesti, mistä johtuen kaavassa käytetyn ajanjakson pituutena käytettiin kuukausikohtaista tuntimäärää. Säävyöhykkeen I kuukausittaiset ulkoilman keskilämpötilat ja tuntimäärät on esitetty alla olevassa taulukossa 7.

Taulukko 7. Säävyöhykkeen I kuukausittaiset ulkoilman keskilämpötilat T_u ja tuntimäärät (Rakennusten energiatehokkuus 2011, 30).

	T_u [°C]	aika [h]
tammikuu	-3,97	744
helmikuu	-4,5	672
maaliskuu	-2,58	744
huhtikuu	4,5	720
toukokuu	10,76	744
kesäkuu	14,23	720
heinäkuu	17,3	744
elokuu	16,05	744
syyskuu	10,53	720
lokakuu	6,2	744
marraskuu	0,5	720
joulukuu	-2,19	744
koko vuosi	5,57	8760

Alapohjan johtumislämpöhäviöitä ei voitu laskea suoraan edellä esitetyllä kaavalla 2, sillä kaava laskee johtumislämpöhäviöt sisä- ja ulkoilman lämpötilaeroon perustuen. Alapohjan lämpöhäviöiden laskennassa tulee kuitenkin huomioida, että maaperän kuukausittaiset lämpötilaerot ovat ulkoilman kuukausittaisia lämpötilaeroja pienempiä ja lisäksi maaperä on talvikuukausina keskimäärin ulkoilmaa lämpimämpää. Näin ollen alapohjan johtumislämpöhäviöiden laskemiseksi kaavassa 2 tulee ulkoilman lämpötilan sijaan käyttää maaperän vuosittaista tai kuukausittaista lämpötilaa, riippuen johtumislämpöhäviön tarkastelujakson pituudesta. Alapohjan vuotuinen johtumislämpöhäviö laskettiin kuukausi kerrallaan käyttäen kaavassa 2 maaperän kuukausittaisia lämpötiloja, jotka voitiin laskea kaavoilla 3 ja 4 (Energiatehokkuus 2017, 20).

$$T_{\text{maa,kuukausi}} = T_{\text{maa,vuosi}} + \Delta T_{\text{maa,kuukausi}} \quad (3)$$

jossa

$T_{\text{maa,kuukausi}}$ = alapohjan alapuolisen maan kuukausittainen keskilämpötila [°C]

$T_{\text{maa,vuosi}}$ = alapohjan alapuolisen maan vuotuinen keskilämpötila [°C]

$\Delta T_{\text{maa,kuukausi}}$ = alapohjan alapuolisen maan kuukausittaisen ja vuotuisen keskilämpötilan ero [°C]

$$T_{\text{maa,vuosi}} = T_{\text{u,vuosi}} + \Delta T_{\text{maa,vuosi}} \quad (4)$$

jossa

$T_{\text{maa,vuosi}}$ = alapohjan alapuolisen maan vuotuinen keskilämpötila [°C]

$T_{\text{u,vuosi}}$ = ulkoilman vuotuinen keskilämpötila [°C]

$\Delta T_{\text{maa,vuosi}}$ = alapohjan alapuolisen maan kuukausittaisen ja vuotuisen keskilämpötilan ero = 5 °C

Kaavassa 3 alapohjan alapuolisen maan kuukausittaisen ja vuotuisen keskilämpötilan eron tietoina ($\Delta T_{\text{maa,kuukausi}}$) käytettiin taulukossa 8 esitettyjä tietoja. Tiedot saatiin Ympäristöministeriön julkaisemasta energiatehokkuuden laskentaoppaasta (Energiatehokkuus 2017, 20). Kaavassa 4 ulkoilman vuotuisena keskilämpötilana $T_{\text{u,vuosi}}$ käytettiin rakentamismääräyskokoelman osiossa D3 (Rakennusten energiatehokkuus 2011, 29) esitettyä vyöhykkeen I tietoa.

Taulukko 8. Alapohjan alapuolisen maan kuukausittaisen ja vuotuisen keskilämpötilan ero (Energiatehokkuus 2017, 20).

	$\Delta T_{\text{maa, kuukausi}}$ [°C]
tammikuu	0
helmikuu	-1
maaliskuu	-2
huhtikuu	-3
toukokuu	-3
kesäkuu	-2
heinäkuu	0
elokuu	1
syyskuu	2
lokakuu	3
marraskuu	3
joulukuu	2

Rakennuksen vuotuisen ostoenergiankulutuksen ja rakennusosien johtumislämpöhäviöiden laske-
misen jälkeen laskettiin energiankulutuksesta aiheutuva hiilijalanjälki. Hiilijalanjälki laskettiin ener-
giamuodoittain käyttäen Rakentamisen päästötietokannan hyödynjakomenetelmän energiaske-
naarion päästökertoimia. Hyödynjakomenetelmän päästökertoimet ovat konservatiivisia arvoja,
joita käytetään rakentamislupaa haettaessa. Laskennassa käytetyt energiaskenaariot on esitetty
alla olevassa taulukossa 9.

Taulukko 9. Kaukolämmön ja sähkön energiaskenaariot (Rakentamisen päästötietokanta 2022).

vuosi	kaukolämpö [kgCO ₂ e/kWh]	sähkö [kgCO ₂ e/kWh]
2020	0,147	0,153
2030	0,114	0,089
2040	0,082	0,059
2050	0,054	0,045
2060	0,029	0,034
2070	0,021	0,022
2080	0,015	0,015

Rakennusosien johtumislämpöhäviöiden energiamuotona käytettiin rakennuksen lämmitystavan
mukaisesti kaukolämpöä. Energiamuotojen vuotuiset päästökertoimet laskettiin taulukossa 9 esi-
tetyistä arvoista lineaarisesti interpoloimalla. Alla on esitetty esimerkki lineaarisesta interpoloin-
nista kaukolämmön vuoden 2023 päästökertoimen selvittämiseksi.

$$GWP_{\text{kaukolämpö, 2023}} = 0,147 + (0,114 - 0,147)/10 \times (2023 - 2020) = 0,137 \text{ kgCO}_2\text{e/kWh}$$

6.3.5 Elinkaaren loppu C1–C4

Vähähiilisyyden arviointimenetelmän mukaan rakennuksen elinkaaren loppuvaiheessa huomioi-
daan purkamisesta, purkujätteiden kuljetuksista ja käsittelystä sekä loppusijoituksesta aiheutuva
hiilijalanjälki. Elinkaaren loppuvaiheen hiilijalanjälki voidaan laskea tarkasti, esimerkiksi kuljetuk-
sissa huomioidaan tällöin kaikki kuljetukset rakennukselta jätteenkäsittelyyn ja takaisin, työmaan
osalta päästöt lasketaan puolestaan kulutetun ostoenergian ja polttoaineiden määrän, energia-
muotojen sekä polttoaineiden päästökertoimien avulla. Laskentakohteen osalta elinkaaren lopun

päästöt huomioitiin Vähähiilisyyden arviointimenetelmässä esitetyillä taulukkoarvoilla (ks. taulukko 2), sillä taulukkoarvoilla arvioitiin saatavan riittävä kuva elinkaaren lopun päästöistä. Elinkaaren loppuvaiheen hiilijalanjälki laskettiin seuraavasti:

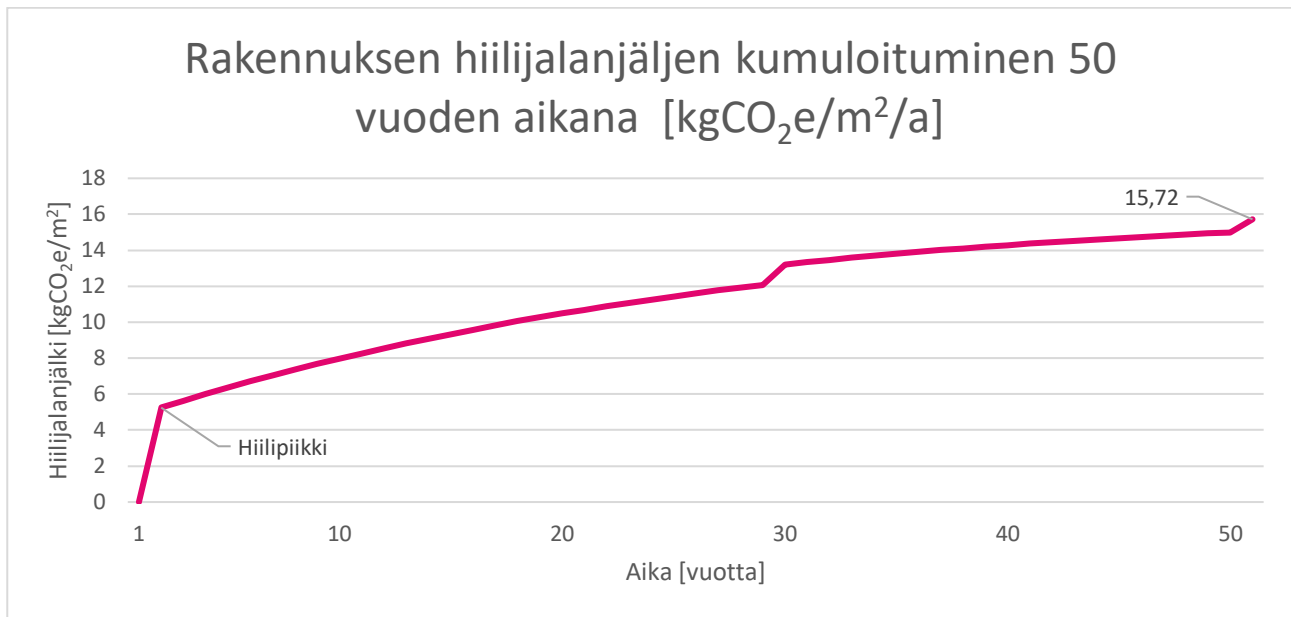
$$\text{Hiilijalanjälki C1-C4} = (7,80 + 10,20 + 15,60) \text{ kgCO}_2\text{e/m}^2 \div 50 = 0,67 \text{ kgCO}_2\text{e/m}^2/\text{a}$$

7 Tulokset ja johtopäätökset

Tässä luvussa esitetään tutkimuksen laskentakohteena olleen 1970-luvun opetusrakennuksen peruskorjauksen hiilijalanjälkilaskennan tulokset rakennuksen elinkaaren ajalta. Tulosten analysoinnin pohjalta esitetään johtopäätöksiä ja lisäksi tarkastellaan tulosten luotettavuutta. Tulokset esitetään rakennuksen elinkaaren hiilijalanjäljen kokonaistuloksesta alkaen, tarkentaen aina rakennusosakohtaisiin hiilijalanjälkituloksiin asti. Tutkimuksen tuloksia peilataan soveltuvilta osin rakennusten hiilijalanjälkeä käsittelevään tutkimuskirjallisuuteen, jota on myös esitetty tämän työn luvuissa 2–3.

7.1 Peruskorjatun 1970-luvun opetusrakennuksen elinkaaren hiilijalanjälki

Peruskorjatun rakennuksen elinkaaren aikana aiheutuvan hiilijalanjäljen kokonaistulokseksi saatiin yhteensä 1 899 029 kgCO₂e. Rakennuksen 2 416 m² lämmitetylle nettoalalle ja suunnitellulle 50 vuoden käyttöiälle jaettuna tulokseksi muodostui 15,72 kgCO₂e. Hiilijalanjäljen kasvussa on tunnistettavissa nopeamman ja hitaamman kasvun vaihteita, jotka ilmenevät hyvin alla esitetyn kuvion 28 rakennuksen hiilijalanjäljen kumuloitumista kuvaavasta käyrästä.



Kuvio 28. Laskentakohteen hiilijalanjäljen kumuloituminen 50 vuoden elinkaaren aikana.

Kuviota 28 tarkasteltaessa on huomattavissa, että hiilijalanjäljessä esiintyy voimakasta kasvua elinkaaren alkuvaiheessa ja vuosien 30 ja 50 kohdilla. Elinkaaren alussa esiintyvän kasvun aiheuttaa materiaalien valmistuksesta ja työmaatoiminnoista aiheutuvat päästöt, eli rakennuksen elinkaaren vaiheet A1–A5. Vaiheiden A1–A5 päästöjen tulokseksi saatiin yhteensä 537 560 kgCO₂e, joka on rakennuksen käyttöiälle ja neliömäärälle jaettuna 4,45 kgCO₂e/m²/a. Alkuvaiheen nopeaa päästökehitystä kutsutaan tutkimuskirjallisuudessa yleisesti ”hiilipiikiksi” ja ilmiötä on kuvattu mm. Ruuskan & Häkkisen (2015) sekä Röckin ja muiden (2020) rakennusten hiilijalanjälkeä tarkastelevissa tutkimuksissa.

Laskentakohteen tuotevaiheen A1–A3 päästöjen suuruudeksi saatiin yhteensä 446 960 kgCO₂e (3,70 kgCO₂e/m²/a) ja rakentamisvaiheen A4–A5 90 600 kgCO₂e (0,75 kgCO₂e/m²/a). Kun vertaillaan päästöjen suuruutta keskenään, voidaan huomata, että tuotevaiheen osuuden ollessa 83 % ja rakentamisvaiheen 17 %, tuotevaiheen päästöt muodostavat laskentakohteen alkuvaiheen hiilipiikistä suurimman osan. Saatu tulos on linjassa tutkimuskirjallisuudessa yleisesti esitettyjen tulosten kanssa. Esimerkiksi Ruuskan ja Häkkisen (2015, 324–326) kerrostalojen hiilijalanjälkeä käsittelevässä tutkimuksessa tuotevaiheen päästöosuudet ovat noin 87 % ja rakentamisvaiheen noin 13 % hiilipiikistä, Huuhkan ja muiden (2021, 22) tutkimuksessa uuden betonirakenteisen koulun vastaa-

vien vaiheiden osuudet ovat 90 % ja 10 %. Tutkimuksen laskentakohteena olleessa opetusrakennuksessa tuotevaiheen osuus hiilipiikin päästöistä on todennäköisesti tulokseksi saatua osuutta jonkin verran isompi. Tämä johtuu siitä, että laskentakohteen rakentamisvaiheen A4–A5 hiilijalanjäljen laskemiseen käytettiin Vähähiilisyyden arviointimenetelmässä esitettyjä taulukkoarvoja, jotka perustuvat uudisrakennuksen työmaatoiminnoista kerättyihin päästötietoihin. Laskentakohteen olleessa peruskorjattavassa opetusrakennuksessa mm. rakennuksen kantava runko jää paikalleen, mikä pienentää rakentamisvaiheen materiaalien kuljetustarvetta ja rakentamisen energiankulutusta, ja näin ollen pienentää työmaavaiheen päästöjä uudisrakentamiseen verrattuna.

Koska rakennusten elinkaaren alkuvaiheen hiilipiikistä valtaosa muodostuu materiaalien päästöistä, on hiilipiikin muodostuminen elinkaaren alussa väistämätöntä. Edellä mainittuun perustuen hiilipiikki on lähtökohtaisesti suurempi uudisrakennuksessa kuin peruskorjattavassa rakennuksessa, Huuhkan ja muiden (2021, 23) tutkimuksen mukaan peruskorjauksen hiilipiikki ei ylitä uudisrakentamisen hiilipiikkiä, vaikka peruskorjaukseen sisältyisi uudisrakentamista rakennuksen laajentamisen muodossa. Koska hiilipiikin suuruus riippuu vahvasti materiaalipäästöistä, on hiilipiikkiä mahdollista pienentää valitsemalla rakennukseen vähäpäästöisempiä materiaaleja. Hiilipiikkiä ei kuitenkaan kannata pienentää ulkovaipan rakenteiden lämmöneristävyyden kustannuksella, sillä rakenteiden lämmöneristävyys vaikuttaa merkittävästi rakennuksen koko elinkaaren hiilijalanjälkeen.

Elinkaaren alkuvaiheen hiilipiikin jälkeen kuvion 28 käyrän mukaan opinnäytetyön laskentakohteen hiilijalanjälki kasvaa maltillisemmin aina 30 vuoden käyttöikään asti. Hiilipiikin ja 30 vuoden käyttöiän välisellä ajalla rakennuksen hiilijalanjälkeä kasvattaa rakennuksen ostoenergiankulutus, joka laskentakohteen tapauksessa muodostuu kaukolämmön ja sähkönkulutuksesta. 30 vuoden kohdalla hiilijalanjälki kasvaa merkittävämmiin ja hiilijalanjäljen kumuloitumista kuvaavassa käyrässä on nähtävissä pieni pykälä. Tämä hetkellinen hiilijalanjäljen voimakkaampi kasvu johtuu käyttökänsä päähän tulevien rakennusmateriaalien ja talotekniikan järjestelmän osien korjaamisen ja uusimisen sekä korjaamisen energiankäytön aiheuttamista päästöistä, eli rakennuksen elinkaaren vaiheiden B3–B4 päästöistä. Rakennusmateriaalien uusimisen päästöiksi saatiin yhteensä 38 639 kgCO₂e (0,32 kgCO₂e/m²/a) ja talotekniikan päästöiksi 77 312 kgCO₂e (0,64 kgCO₂e/m²/a). Rakennusmateriaalien osalla korjausvaiheen päästöjä nostaa merkittävimmin lattioiden pintarakenteiden uusiminen 16 189 kgCO₂e (0,13 kgCO₂e/m²/a), jossa käyttökänsä 30 vuoden aikana saavuttaa

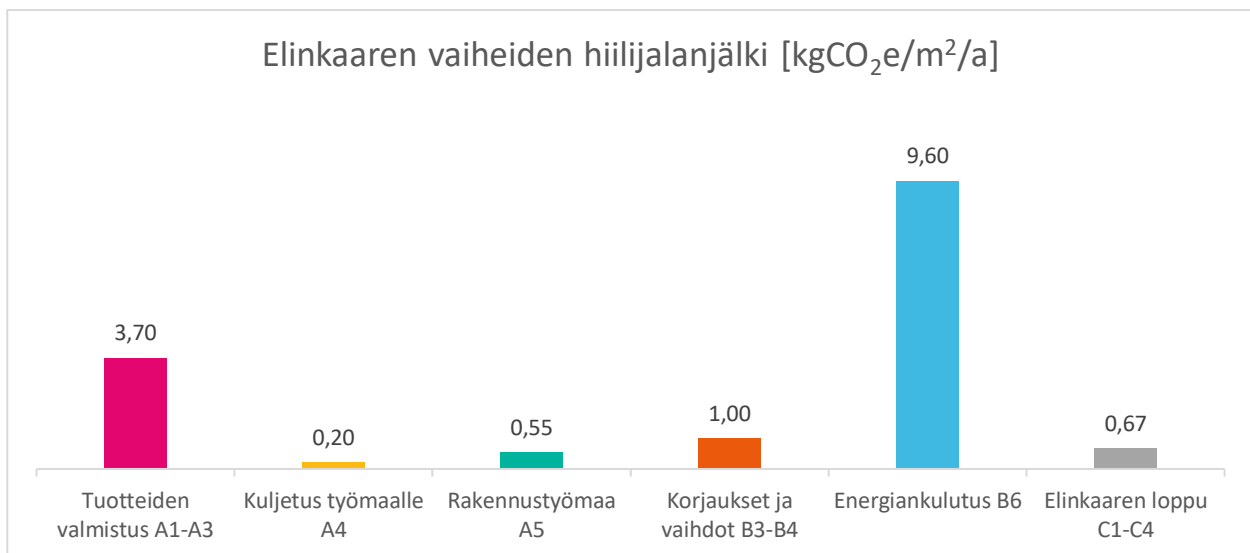
kuivien tilojen lattian vinyylilaatoitus ja märkätilojen lattian vedeneristys. Lattian vedeneristyksen uusiminen johtaa myös lattian keraamisen laatoituksen uusimiseen. Toinen rakennusmateriaalien korjausvaiheen päästöjä merkittävästi nostava tekijä on bitumikermivesikatteen uusiminen, jonka päästöiksi saatiin 9 058 kgCO₂e (0,07 kgCO₂e/m²/a). Korjausvaiheen energiankulutuksen osalta laskennassa käytettiin Vähähiilisyyden arviointimenetelmän taulukkoarvoa ja tulokseksi saatiin 5 219 kgCO₂e (0,04 kgCO₂e/m²/a). Korjausvaiheen B3–B4 hiilijalanjäljeksi saatiin yhteensä 120 800 kgCO₂e (1,00 kgCO₂e/m²/a).

Laskennan tulosten perusteella laskentakohteen korjausvaiheen B3–B4 päästöjen pienentäminen vähäpäästöisempien rakennusmateriaalien avulla olisi haastavaa, sillä esimerkiksi vesikatteen bitumikermille ei tällä hetkellä ole olemassa sopivaa vähäpäästöisempää vaihtoehtoa, käytännössä bitumikatteen osalta päästöjen väheneminen tapahtunee bitumituoteteollisuuden päästöjen vähenemisen kautta, jolloin tulevaisuuden bitumituotteet voisivat olla vähäpäästöisempiä kuin laskentahetkellä. Kuivien tilojen osalla B3–B4 vaiheen päästöjä voitaisiin vähentää vaihtamalla vinyylilaatoitus keraamiseen laatoitukseen, jota ei lähtökohtaisesti tarvitse vaihtaa rakennuksen 50 vuoden elinkaaren aikana. Näin ollen kuivien tilojen lattiapintamateriaaleista ei aiheutuisi lainkaan päästöjä vaiheessa B3–B4. Keraamisen laatoituksen neliökohtaisen päästön ollessa noin puolet vinyylilaattaa suurempi, nostaisi materiaalin vaihtaminen kuitenkin vaiheen A1–A3 päästöjä lattia-materiaalin osalta ja päästöjä vähentävä vaikutus rakennuksen elinkaaren ajalta olisi arviolta vähäinen. B3–B4 vaiheessa päästöjen säästöpotentiaalia voisi olla talotekniikan osalla, koska talotekniikka muodostaa laskentakohteessa 64 % B3–B4 vaiheen päästöistä. Talotekniikan säästöpotentiaalin tarkastelu edellyttäisi kuitenkin talotekniikan päästöjen tarkkaa laskemista lvis-suunnitelmien pohjalta, suunnitelmien puuttuessa tätä ei kuitenkaan laskentakohteen osalta ollut mahdollista tehdä.

Kuvion 28 mukaan korjausvaiheen B3–B4 jälkeen laskentakohteen kumulatiivinen hiilijalanjälki kasvaa maltillisesti noin 20 vuoden ajan rakennuksen ostoenergiankulutuksen myötä. Hiilijalanjäljen kasvu on tässä vaiheessa hieman hitaampaa kuin elinkaaren alun hiilipiikin ja 30 vuoden kohdalle ajoittuvan korjaus- ja uusimisvaiheen B3–B4 välisenä aikana. Ostoenergiankulutuksesta aiheutuva hiilijalanjäljen hitaampi kasvu johtuu ostoenergian energiaskenaarioiden mukaisesta energiantuotannon päästöjen vähenemisestä. Rakennuksen elinkaaren lopussa on havaittavissa vielä yksi hiilijalanjäljen nopeampi kasvu, tämä kasvu johtuu rakennuksen purkuvaiheen C1–C4

päästöistä. Elinkaaren lopun päästöjen laskennassa käytettiin Vähähiilisyiden arviointimenetelmän taulukkoarvoja ja tulokseksi saatiin 81 178 kgCO₂e (0,67 kgCO₂e/m²/a).

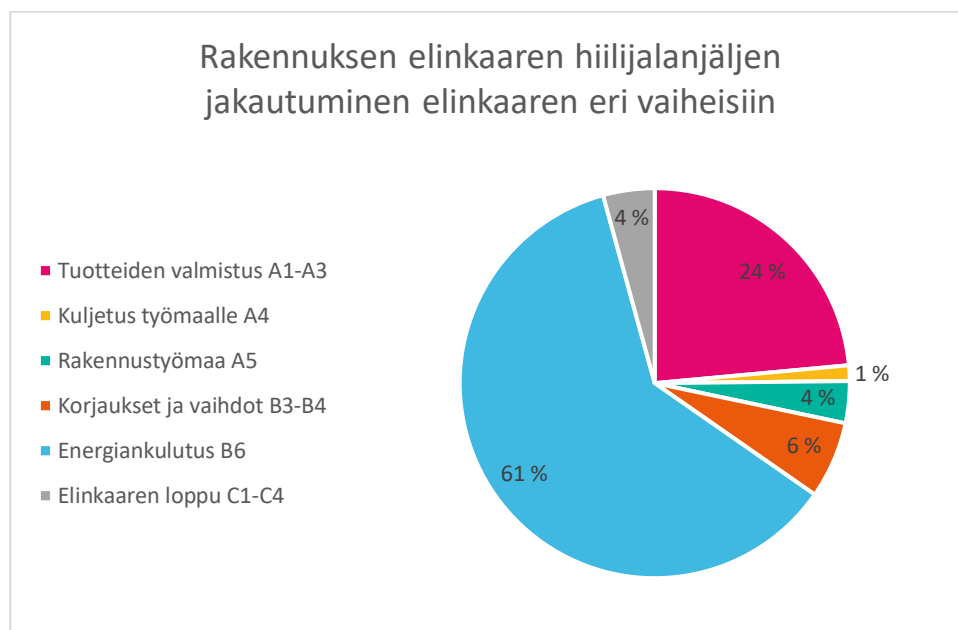
Tarkasteltaessa laskentakohteena olleen peruskorjatun 1970-luvun opetusrakennuksen hiilijalanjäljen jakautumista rakennuksen elinkaaren eri vaiheisiin, huomataan että suurin osa rakennuksen hiilijalanjäljestä muodostuu käytön aikaisesta energiankulutuksesta, vaiheen B6 tulokseksi saatiin 1 159 209 kgCO₂e (9,6 kgCO₂e/m²/a). Energiankulutuksen jälkeen suurin hiilijalanjälki aiheutuu tuotevaiheessa A1–A3. Elinkaaren muiden vaiheiden hiilijalanjäljet aiheuttavat vaiheisiin A1–A3 ja B6 nähden merkittävästi vähemmän päästöjä. Elinkaaren eri vaiheiden hiilijalanjäljet rakennuksen lämmitetyille neliömäärälle ja 50 vuoden käyttöiälle jaettuina on esitetty kootusti alla olevassa kuviossa 29.



Kuvio 29. Laskentakohteena olleen 1970-luvun opetusrakennuksen elinkaaren vaiheiden hiilijalanjälkien suuruudet.

Prosentuaalisesti tarkasteltuna laskentakohteen elinkaaren vaiheiden osuudet jakautuvat kuvion 30 mukaisesti. Kuviosta on nähtävissä mm., että käyttövaiheen energiankulutuksen B6 osuus hiilijalanjäljestä on 61 % ja tuote- ja rakentamisvaiheen A1–A5 osuus 29 %, yhdessä nämä vaiheet muodostavat 90 % rakennuksen elinkaaren hiilijalanjäljestä. Tulos vastaa tutkimuskirjallisuudessa esitettyjä tuloksia, Ruuskan ja Häkkisen (2015, 324–326) tutkimuksessa energiankulutus muodos-

taa 63 % ja tuote- ja rakentamisvaihe 30 %, Laineen ym. (2020, 56–57) tutkimuksessa energiankulutus on 68 % ja tuote- ja rakentamisvaihe 25 %. Edellä mainittujen tutkimusten tulosten kuviot on esitetty luvussa 2.4.



Kuvio 30. Laskentakohteen elinkaaren hiilijalanjäljen jakautuminen elinkaaren vaiheisiin.

Opinnäytetyön yhtenä tavoitteena oli tarkastella laskentakohteena olleen 1970-luvun opetusrakennuksen koko elinkaaren hiilijalanjäljen vertautumista vastaavan uuden opetusrakennuksen hiilijalanjälkeen. Uuden opetusrakennuksen hiilijalanjäljen vertailutiedoksi valittiin Huuhkan ja muiden (2021) tutkimuksessa laskettu uuden betonirakenteisen koulun hiilijalanjälkitieto ja Bionova Oy:n (2021) tutkimuksessaan määrittämä uuden referenssikoulurakennuksen hiilijalanjälkitieto. Huuhkan ja muiden (2021, 46) tutkimuksessa uuden betonirakenteisen koulun hiilijalanjäljen suuruudeksi on saatu $17,64 \text{ kgCO}_2\text{e/m}^2/\text{a}$, mikä on $1,92 \text{ kgCO}_2\text{e/m}^2/\text{a}$ suurempi kuin tässä työssä lasketulla peruskorjatulla opetusrakennuksella. Huuhkan ja muiden tutkimuksessa laskenta on tehty laajuudeltaan ja perusominaisuuksiltaan opinnäytetyön laskentakohdetta vastaavaan rakennukseen; rakennuksessa on mm. koneellinen tulo- ja poistoilmanvaihto, kaukolämmitys ja rungon materiaalina betoni (mts. 42).

Bionova Oy:n tutkimuksessa hiilijalanjälki on laskettu rakenteiltaan ja ominaisuuksiltaan tyypillistä uutta koulurakennusta vastaavalle rakennukselle, josta tutkimuksessa käytetään termiä ”referenssirakennus”. Referenssirakennuksen ominaisuuksien määrittäminen on tehty laajaan tilastolliseen aineistoon pohjautuen; materiaalien osalta aineistona on käytetty 482:n rakennuksen materiaali-päästötietoja, laskennassa käytetyt energiankulutustiedot pohjautuvat puolestaan lähes 4000:n enintään kolme vuotta vanhan rakennuksen energiatodistustietoihin (Carbon Footprint Limits for Common Building Types 2021, 17). Bionova Oy:n (2012, 17) tutkimuksessa uuden referenssikoulurakennuksen hiilijalanjäljeksi on saatu 15,08 kgCO₂e/m²/a, mikä on puolestaan 0,64 kgCO₂e/m²/a vähemmän kuin tämän työn laskentakohteen elinkaaren hiilijalanjälki. Myös Bionovan tutkimuksessaan käyttämä rakennus on laajuudeltaan ja perusominaisuuksiltaan opinnäytetyön laskentakohtetta vastaava. Opinnäytetyön peruskorjatun 1970-luvun opetusrakennuksen ja vertailuaineistona käytetyissä tutkimuksissa esitettyjen opetusrakennusten hiilijalanjäljet ja on esitetty kootusti alla olevassa taulukossa 10.

Taulukko 10. Opetusrakennusten hiilijalanjälkitietojen vertailu.

	Hiilijalanjälki [kgCO ₂ e/m ² /a]	Erotus [kgCO ₂ e/m ² /a]
Peruskorjattu 1970 opetusrakennus	15,72	-
Uusi opetusrakennus (Huuhka ym. 2021)	17,64	+1,92
Uusi opetusrakennus (Bionova Oy, 2021)	15,08	-0,64

Kuten taulukosta 10 ilmenee, opinnäytetyön laskentakohteen elinkaaren hiilijalanjälki asettuu vertailukohteiksi valittujen uusien opetusrakennusten hiilijalanjälkitulosten väliin. Edellä esitettyjen tulosten perusteella onkin haastavaa päätellä, kumpi on loppujen lopuksi ympäristön kannalta vähähiilisempi vaihtoehto: purkava uudisrakentaminen vai rakennuksen peruskorjaaminen. Huuhkan ym. (2021) sekä Bionova Oy:n (2021) tutkimuksissa tehdyt hiilijalanjälkilaskennat on suoritettu opinnäytetyön laskentakohtetta vastaavasti Ympäristöministeriön vuoden 2019 vähähiilisyyden arviointimenetelmällä. Kaikissa tutkimuksissa on myös käytetty taulukkoarvoja niiltä osin, kun Vähähiilisyyden arviointimenetelmä taulukkoarvojen käytön mahdollistaa. Merkittävimpiä eroja opinnäytetyön laskentakohteen ja vertailututkimusten kesken on se, että opinnäytetyössä laskentaan ei sisällytetty jäähdytyksen aiheuttamaa hiilijalanjälkeä vaiheissa A1–A3, B3–B4 ja B6.

Jäähdytyksen vaikutuksen suuruusluokkaa voidaan kuitenkin arvioida Bionovan (2021) tutkimuksen ja Rakentamisen päästötietokannan avulla. Bionovan tutkimuksessa esitetyn mukaan uuden opetusrakennuksen keskimääräinen vuotuinen jäähdytysenergian kulutus on $0,1 \text{ kWh/m}^2/\text{a}$ (Carbon Footprint Limits for Common Building Types 2021, 11). Jos opinnäytetyön laskentakohteelle lasketaan vuotuinen jäähdytysenergiankulutus edellä mainitulla arvolla, kertomalla kulutusarvo laskentakohteen neliömäärällä (2416 m^2), tulokseksi saadaan 242 kWh . Kun muutetaan tämä vuosittain yhdelle neliölle kohdistuvaksi hiilijalanjäljeksi käyttäen Rakentamisen päästötietokannassa esitettyä kaukojäähdytyksen hyödynjakomenetelmän energiaskenaariota, tulokseksi saadaan $0,002 \text{ kWh/m}^2/\text{a}$, joten jäähdytysjärjestelmän energiankulutus ei kasvata rakennuksen hiilijalanjälkeä käytännössä lainkaan. Jäähdytysjärjestelmästä aiheutuu kuitenkin päästöjä myös elinkaaren vaiheissa A1–A4 ja B3–B4, joita ei ole sisällytetty laskentakohteen tulokseen. Rakentamisen päästötietokannan mukaan koulurakennuksen jäähdytysjärjestelmän päästöt vaiheista A1–A3 ja B3–B4 ovat yhteensä $0,12 \text{ kWh/m}^2/\text{a}$. Näin ollen Bionovan tutkimuksessa esitettyyn jäähdytysenergiankulutustietoon ja Rakentamisen päästötietokannan tietoihin perustuen laskentakohteen jäähdytyksestä aiheutuisi $0,12 \text{ kWh/m}^2/\text{a}$ lisä rakennuksen elinkaaren hiilijalanjälkeen ja tällöin hiilijalanjälki olisi $15,84 \text{ kWh/m}^2/\text{a}$.

Käytännössä laskentakohteen jäähdytyksen hiilijalanjälki olisi arvoa $0,12 \text{ kWh/m}^2/\text{a}$ hieman suurempi, koska edellä esitetystä laskelmasta käytettiin uuden koulurakennuksen keskimääräistä jäähdytysenergiakulutustietoa. Laskentakohteen ulkovaipan lämmöneristävyys ei ole kuitenkaan uudisrakennusta vastaavalla tasolla, mikä lisää jossain määrin jäähdytysenergiankulutusta. Toisaalta kun huomioidaan se, että laskentakohteen hiilijalanjäljen laskennassa käytetyt työmaavaiheiden A4–A5 taulukkopäästötiedot ovat laadittu uudisrakennuksen hiilijalanjäljen arviointiin ja arvot ovat siten peruskorjauskohteelle todennäköisesti turhankin suuret, jäähdytyksen sisällyttäminen hiilijalanjälkeen ei lisäisi arviolta juurikaan laskentakohteen elinkaaren kokonaishiilijalanjälkeä ja hiilijalanjälkitulos sijoittuisi edelleen vertailututkimusten hiilijalanjälkitulosten väliin.

Opinnäytetyön laskentakohteen hiilijalanjäljen vertailu Huuhkan ym. (2021) ja Bionova Oy:n (2021) tutkimusten vastaaviin uudisrakennuksiin osoittaa sen, että peruskorjatun rakennuksen elinkaaren hiilijalanjälki voi asettua hyvin lähelle vastaavan uudisrakennuksen hiilijalanjälkeä. Vertailusta korostuu se, että yleispätevää päätelmää siitä, kumpi on 50 vuoden elinkaaren aikana vähähiilisempi vaihtoehto, peruskorjattu opinnäytetyön laskentakohdetta vastaava 1970-luvun opetusrakennus

vai vastaava uudisrakennus, ei voida täysin luotettavasti tehdä. Vertailun perusteella voidaan kuitenkin todeta, että peruskorjattavan rakennuksen hiilijalanjälki voi olla pienempi kuin uudisrakennuksella ja tapauskohtainen hiilijalanjäljen vertailu on siten suositeltavaa tehdä.

Tulevaisuudessa rakennusten elinkaaren hiilijalanjälkeä tullaan vertaamaan ensisijaisesti asetuksella määritettyihin raja-arvoihin. Opinnäytetyön kirjoitushetkellä Suomessa käytettävien raja-arvojen laatiminen on vielä kesken ja ennen raja-arvojen määrittämistä tullaan mm. päivittämään vielä Vähähiilisyyden arviointimenetelmä ja kansallinen päästötietokanta. Näiden päivittämisen jälkeen raja-arvot voitaisiin Ympäristöministeriön mukaan määrittää esimerkiksi laskemalla tarpeeksi kattava otos erilaisten rakennustyyppien hiilijalanjäljen vaihteluväleistä, huomioiden laskentatuloksiin vaikuttavat erilaiset muuttuja, kuten mm. laskentaan käytetty ohjelmisto tai rakennuksen perustamisolosuhteet. Vaihteluvälien selvittämisen jälkeen tarkasteltaisiin hiilijalanjäljen pienentämisen keinoja ja näiden vaikutuksia mm. ympäristöön ja talouteen. (Kuittinen 2023.)

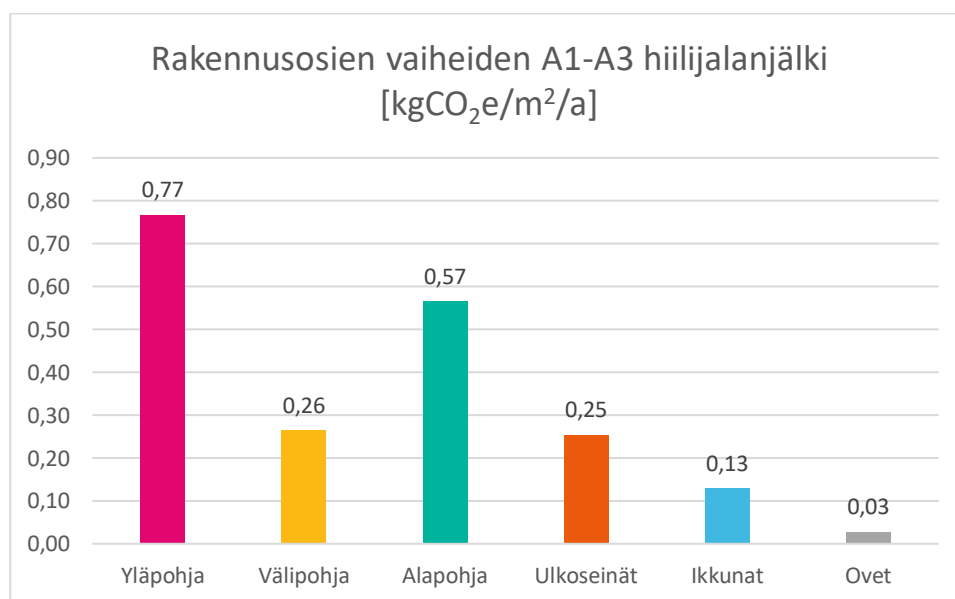
Yhtenä vaihtoehtona raja-arvojen määrittämiseen nähdään myös ns. Tanskan malli, jossa hiilijalanjäljen raja-arvo on määritetty laskemalla otos uusien rakennusten hiilijalanjälkiä, minkä pohjalta raja-arvon lähtötasoksi määritettiin arvo, jonka saavutti 90 % lasketuista rakennuksista. Mallissa raja-arvo tiukkenee kahden vuoden sykleittäin. (Mts.) Tanskan mallissa vuoden 2023 raja-arvoksi on määritetty $12 \text{ kgCO}_2\text{e/m}^2/\text{a}$. Jos Tanskan malli tulisi käyttöön Suomessa sellaisenaan, niin opinnäytetyön laskentakohteen hiilijalanjälki ($15,72 \text{ kgCO}_2\text{e/m}^2/\text{a}$) ei täyttäisi raja-arvovaatimusta. Toisaalta kun huomioidaan Tanskan leudompi ilmasto, on mahdollista, että Suomessa käytettävä raja-arvo olisi rakennusten suuremmasta lämmitystarpeesta johtuen lähtökohtaisesti suurempi ja tällöin opinnäytetyön laskentakohteen hiilijalanjälki voisi asettua melko lähellekin vaadittua tasoa.

7.2 Peruskorjattujen rakennusosien hiilijalanjälki

Laskentakohteena olleen peruskorjatun 1970-luvun opetusrakennuksen rakennusosien korjausten vaikutusta rakennuksen hiilijalanjälkeen tarkasteltiin tuotevaihe A1–A3, käytönaikaisten korjausten ja osien vaihto -vaiheen B3–B4 materiaalipäästöt ja käytön aikainen energiankulutus B6 huomioiden. Rakennusosien kohdalla tarkastelussa ei huomioitu elinkaaren vaiheita, joiden päästöt perustuivat taulukkoarvoon. Edellä kuvattuja vaiheita olivat: työmaan päästöt A4–A5, vaiheen B3–B4 korjausten energiankulutus ja elinkaaren loppuvaihe C1–C4. Tähän päädyttiin sen seurauksena, että taulukkoarvoina huomioitujen päästöjen jakautumista tarkasteltaville rakennusosille ei voitu

luotettavasti arvioida, sillä taulukkoarvojen päästötiedoissa on huomioitu koko rakennuksen päästöt, eikä vain peruskorjattavien tarkasteluun valittujen rakennusosien päästöt kyseisessä elinkaaren vaiheessa. Toinen peruste vaiheiden karsimiselle oli, että vaiheet A4–A5 ovat peruskorjauskohteelle arviolta jonkin verran yläkanttiin, sillä vaiheiden taulukkoarvot on laadittu uudisrakennuksen päästötietojen arvioimiseksi. Lisäksi kuten kuvioista 29 ja 30 ilmenee, tuotevaihe A1–A3 ja käytön aikainen energiankulutus B6 muodostavat yhdessä valtaosan rakennuksen päästöistä, joten näiden vaiheiden päästöjen huomioimisella arvioitiin saatavan riittävä kuva peruskorjattavien rakennusosien hiilijalanjäljen keskinäisestä vertautumisesta.

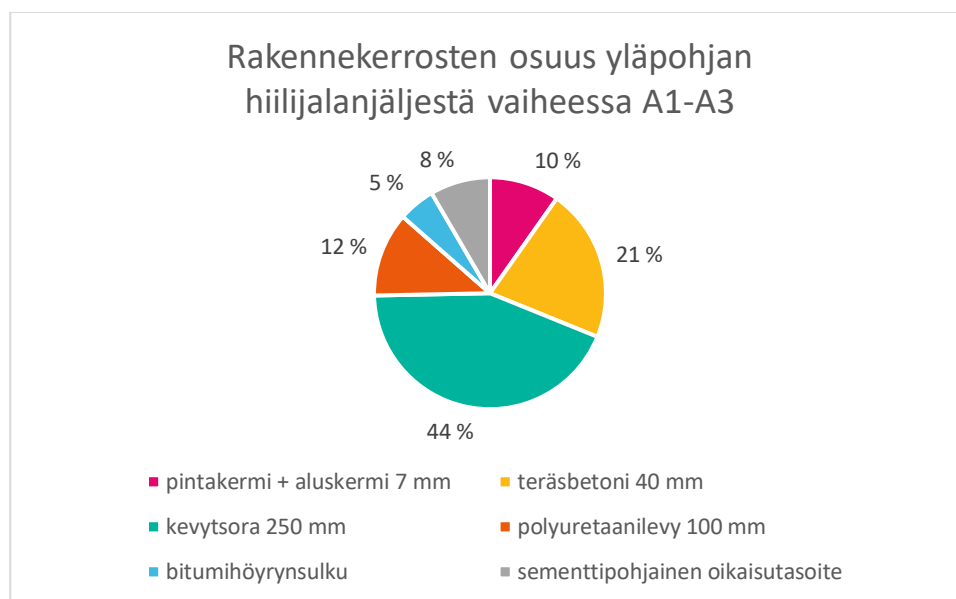
Rakennusosien peruskorjauksen tuotevaiheen A1–A3 hiilijalanjäljen laskentatulokset on esitetty alla olevassa kuviossa 31. Tulosten mukaan yläpohjien ja alapohjien peruskorjaamisesta aiheutuva hiilijalanjälki on merkittävä, yläpohjien peruskorjaamisen hiilijalanjäljen ollessa kaikista tarkastelluista rakennusosista suurin. Yläpohjien korjaaminen tuottaa yksinään enemmän päästöjä ($0,77 \text{ kgCO}_2\text{e/m}^2/\text{a}$) kuin välipohjien, ulkoseinien, ikkunoiden ja ovien korjaukset yhteensä ($0,67 \text{ kgCO}_2\text{e/m}^2/\text{a}$).



Kuvio 31. Rakennusosien peruskorjauksen vaiheiden A1–A3 hiilijalanjälki.

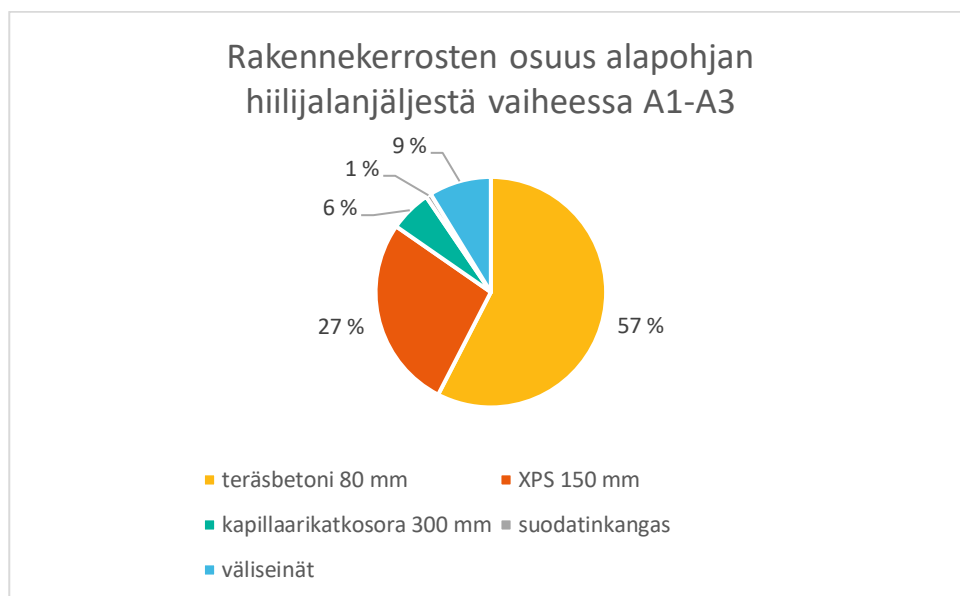
Kun katsotaan tarkemmin yläpohjien korjauksesta aiheutuvaa hiilijalanjälkeä elinkaaren vaiheessa A1–A3, havaitaan, että hiilijalanjälkeen vaikuttaa eniten kevytsoraeristysten uusiminen, osuus 44 %. Toinen merkittävä päästölähde on vesikatteen alustana toimivan teräsbetonivalun uusiminen,

osuus 21 %. Yläpohjien rakennekerrosten osuudet yläpohjien hiilijalanjäljestä ilmenevät kokonaisuudessaan kuviosta 32.



Kuvio 32. Rakennekerrosten osuus yläpohjien hiilijalanjäljestä vaiheissa A1–A3.

Tarkasteltaessa alapohjan vaiheen A1–A3 hiilijalanjäljen jakautumista, huomataan, että eniten päästöjä muodostuu teräsbetoni-laatasta, yhteensä 57 %. Alapohjan toinen merkittävä päästölähde on XPS-lämmöneristys, osuus 27 %. Alapohjan osalta mainittavaa on myös se, että alapohjan korjauksesta johtuva rakennuksen ei-kantavien väliseinien uusimisen vaikutus näkyy myös melko selvästi alapohjan päästöissä väliseinien korjauksen muodostaessa 9 % päästöistä. Välipohjan osalla väliseinien korjauksesta aiheutuva hiilijalanjälki oli vielä tätäkin selvästi suurempi, yhteensä 19 %. Alapohjan vaiheen A1–A3 päästöjen jakautuminen eri rakennekerroksille ilmenee tarkemmin alla esitetystä kuviosta 33.



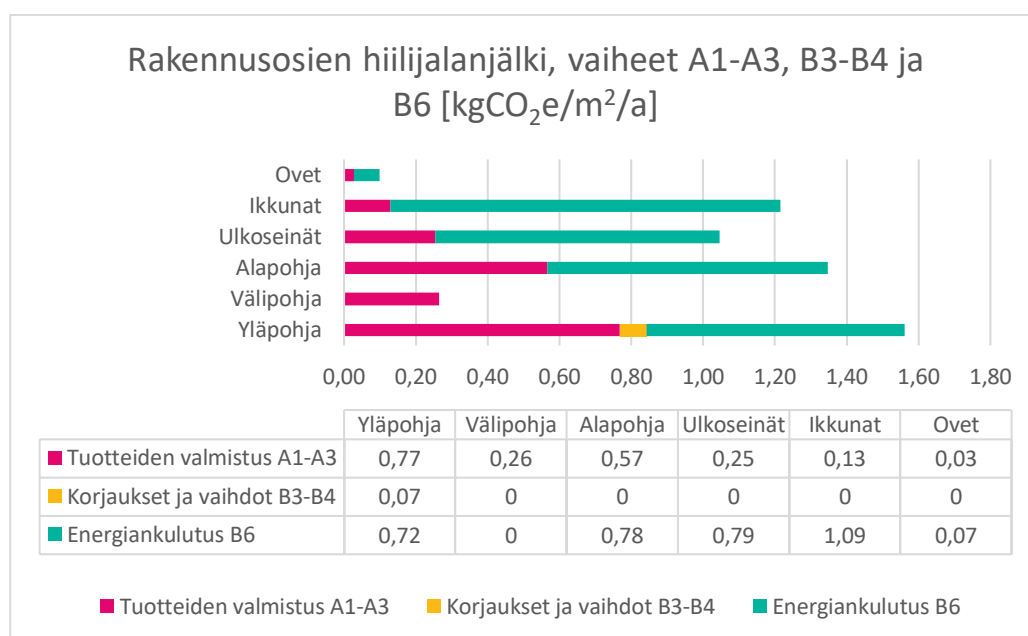
Kuvio 33. Rakennekerrosten osuus alapohjan hiilijalanjäljestä vaiheissa A1–A3.

Rakennusosien käytön aikaisen energiankulutuksen päästöjen laskemiseksi rakennusosille laskettiin vuotuiset johtumislämpöhäviöt. Johtumislämpöhäviöiden laskentatulokset on esitetty alla olevassa taulukossa 11. Selvästi suurin johtumislämpöhäviö on ikkunoilla, joiden kautta lämpöhukkaa aiheutuu vuosittain 39 312 kWh. Alapohjan ja ulkoseinien lämpöhäviöt ovat lähes vastaavat ja yläpohjan lämpöhäviökin samaa suuruusluokkaa, noin 2000 kWh/vuodessa vähemmän kuin alapohjalla ja ulkoseinillä. Ulko-ovien lämpöhäviöllä ei ole juurikaan merkitystä rakennuksen johtumislämpöhäviöihin. Ikkunoiden lämpöhäviöiden korostumisen syynä on, ulko-ovet pois lukien, rakennuksen muihin rakennusosiin verrattuna merkittävästi huonompi U-arvo, mikä nostaa ikkunat niiden verrattain pienestä pinta-alasta huolimatta lämpöhäviöiltään merkittävimmäksi rakennusosaksi.

Taulukko 11. Rakennusosien johtumislämpöhäviöt, U-arvot ja pinta-alat.

Rakennusosa	Johtumislämpöhäviö [kWh/a]	U-arvo [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$]	Pinta-ala [m^2]
Yläpohjat	26021	0,16	1208
Alapohjat	28285	0,23	1208
Ulkoseinät	28607	0,27	787
Ikkunat	39312	1	292
Ovet	2558	1	19

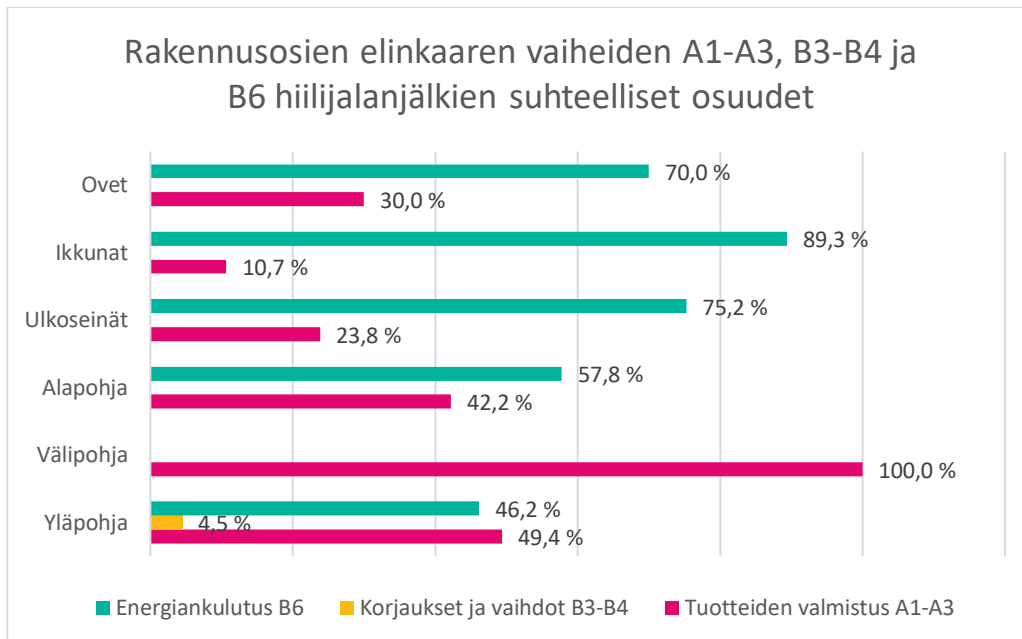
Kun lisätään rakennuksen elinkaaren aikana rakennusosien lämpöhäviöistä aiheutuvat päästöt rakennusosien vaiheiden A1–A3 ja B3–B4 päästöihin, muuttuu kuviossa 31 esitetty rakennusosien järjestys päästöjen suhteen merkittävästi. Alla esitetyn kuvion 34 mukaisesti eniten päästöjä aiheutuu edelleen yläpohjan ja alapohjan osalta, mutta ikkunoiden suurten lämpöhäviöiden myötä ikkunat nousevat kolmanneksi eniten päästöjä tuottavaksi rakennusosaksi. Välipohjan osalta päästöt eivät luonnollisesti kasva vaiheen A1–A3 päästöistä koska rakennusosan kautta ei suoraan aiheudu johtumislämpöhäviötä. Yläpohja on puolestaan ainoa rakennusosa, joka aiheuttaa päästöjä myös korjausten ja osien vaihdon myötä vaiheessa B3–B4, tämä johtuu käytännössä bitumikermivesikatteen uusimisesta rakennuksen saavuttaessa noin 30 vuoden käyttöiän. Rakennusosien lämpöhäviöiden päästölaskelmat on esitetty liitteessä 1.



Kuvio 34. Rakennusosien hiilijalanjäljen suuruudet vaiheissa A1–A3, B3–B4 ja B6.

Tarkasteltaessa alla olevasta kuvioista 35 rakennusosien päästöjen suhteellista jakautumista elinkaaren vaiheisiin A1–A3, B3–B4 ja B6, voidaan pääsääntöisesti todeta, että mitä parempi lämmöneristävyys rakennusosalla on, sitä lähempänä tuotevaiheen A1–A3 ja käyttövaiheen energiankulutuksen B6 päästöt ovat toisiaan. Röckin ja muiden (2020, 7) tutkimuksen mukaan energiatehokkaissa rakennuksissa, kuten esimerkiksi matalaenergiarakennuksissa tuotesidonnaiset päästöt ovat isommat kuin käytönaikaiset päästöt, johtuen rakenteiden hyvästä lämmöneristävyydestä. Säynäjoki ja muut (2012, 6–7) esittävät tutkimuksessaan, että myös energiantuotannon

hiilijalanjäljen pieneneminen vähentää käytönaikaisten päästöjen osuutta rakennuksen elinkaaren hiilijalanjäljestä.



Kuvio 35. Rakennusosien elinkaaren vaiheiden A1–A3, B3–B4 ja B6 osuudet rakennusosien hiilijalanjäljestä.

Opinnäytetyön toisena tavoitteena oli selvittää, minkä rakennusosien korjaaminen nostaa eniten laskentakohteena olleen 1970-luvun opetusrakennuksen peruskorjauksen hiilijalanjälkeä. Edellä esitettyjen opinnäytetyön tutkimustulosten perusteella tutkimuskysymykseen voidaan vastata, että peruskorjauksen tuotevaiheessa A1–A3 päästöjä aiheutuu merkittävimmin yläpohjan, alapohjan ja ulkoseinien sekä välipohjien korjauksesta. Käytön aikaisen energiankulutuksen myötä yläpohja ja alapohja aiheuttavat edelleen eniten päästöjä mutta ikkunat nousevat ulkoseinien ohi kolmanneksi eniten päästöjä aiheuttavaksi rakennusosaksi, välipohjien päästöt jäävät tässä vaiheessa kokonaisuudessaan pieneksi.

8 Pohdinta

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli tarkastella peruskorjatun 1970-luvun opetusrakennuksen hiilijalanjäljen muodostumista 50 vuoden elinkaaren aikana. Rakennuksen peruskorjauksen laajuus ja menetelmät pohjautuivat Ympäristöministeriön Kosteus- ja mikrobivaurioituneiden rakennusten korjaus -julkaisussa esitettyihin raskaampiin, runkorakenteisiin ulotettaviin korjausmenetelmiin, jotka julkaisussa on esitetty korjaustapavaihtoehtona A. Rakennuksen energiatehokkuuden parantaminen suunniteltiin toteutettavaksi siten, että rakennusosien U-arvoja pienennetään puolella alkuperäiseen arvoon verrattuna ja talotekniikkaa Ympäristöministeriön asetuksessa 4/13 esitettyjen vähimmäisvaatimusten mukaisesti.

Peruskorjatun 1970-luvun opetusrakennuksen elinkaaren hiilijalanjäljen tarkastelussa tavoitteena oli saada vastauksia siihen, minkä rakennusosien peruskorjaus nostaa peruskorjauksen hiilijalanjälkeä merkittävimmin, toteutettaessa korjaus edellisessä kappaleessa kuvatun mukaisesti. Lisäksi työn tuloksista kiinnosti tietää, miten peruskorjatun rakennuksen elinkaaren hiilijalanjälki vertautuu vastaavan uudisrakennuksen hiilijalanjälkeen, voisiko peruskorjatun 1970-luvun opetusrakennuksen elinkaaren hiilijalanjälki olla loppujen lopuksi pienempi kuin vastaavalla uudisrakennuksella?

Kuvailluista kahdesta opinnäytetyön tutkimuskysymyksestä selkeämpi vastaus tutkimuksella saatiin rakennusosien peruskorjauksen vaikutuksesta rakennuksen hiilijalanjälkeen. Tutkimuksen tulosten perusteella tuotevaiheessa suurimmat hiilijalanjäljet aiheutuvat yläpohjan ja alapohjan korjauksesta, joista yläpohjan korjaus tuottaa enemmän päästöjä. Ylä- ja alapohjien jälkeen merkittävimmät päästöt aiheutuvat ulkoseinien ja välipohjien korjauksista, näiden rakennusosien päästöt olivat kuitenkin jopa yli puolet pienemmät kuin ylä- ja alapohjilla. Kun tarkasteluun otettiin mukaan käyttövaiheen energiankulutuksesta ja osien vaihdoista aiheutuvat päästöt, niin rakennusosien päästöjen keskinäisessä vertautumisessa tapahtui selkeitä muutoksia. Ylä- ja alapohjat aiheuttivat edelleen suurimmat päästöt mutta ikkunat nousivat päästöiltään ulkoseiniä suuremmaksi. Tulos oli mielenkiintoinen, sillä ikkunoiden pinta-ala oli kuitenkin vain noin kolmanneksen ulkoseinien pinta-alasta. Saatu tulos selittyi ikkunoiden verrattain huonolla U-arvolla, joka oli ulkoseinien U-arvoon nähden noin neljä kertaa suurempi. Tulos kuvasi hyvin rakennusten hiilijalanjälkeen liittyvässä tutkimuskirjallisuudessa, esimerkiksi Röckin ja muiden (2020, 7) sekä Säynäjoen ja

muiden (2012, 6–7) tutkimuksissa esitettyjä tuloksia käytön aikaisen energiankulutuksen hallitsevasta roolista heikommin eristettyjen rakennusten elinkaaren hiilijalanjäljessä. Nykyhetkeen peilattuna tulos auttaa jossain määrin ymmärtämään esimerkiksi EU:n innokkuutta velvoittaa jäsenmaitaan parantamaan rakennuskantansa energiatehokkuutta myös olemassa olevan rakennuskannan osalta (Rakennusten energiatehokkuus: EU-parlamentti hyväksyi kantansa 2023).

Vastaaminen tutkimuskysymykseen peruskorjatun 1970-opetusrakennuksen hiilijalanjäljen vertautumisesta vastaavaan uudisrakennuksen hiilijalanjälkeen osoittautui hieman haastavammaksi. Uudisrakennuksen hiilijalanjälkitulokseksi vertailuun valittiin Huuhkan ja muiden (2021) ja Bionova Oy:n (2021) tutkimuksissa esitetyt uuden koulurakennuksen hiilijalanjälkitiedot. Opinnäytetyössä laskettu peruskorjatun rakennuksen elinkaaren hiilijalanjälkitulos asettui vertailuun valittujen tutkimustulosten väliin. Saatu tulos ei siis sinänsä tuonut selvää vastausta kumpi on ympäristön kannalta kannattavampaa: 1970-luvun opetusrakennuksen kattava peruskorjaaminen vai uudisrakentaminen. Opinnäytetyön tutkimustulos alleviivasi kuitenkin sitä, että peruskorjaaminen voi olla vähäpäästöisempää kuin uudisrakentaminen mutta peruskorjauksen ja uudisrakentamisen hiilijalanjäljen vertautuminen on tapauskohtaista. Edellä mainitun perusteella yleispätevän vastauksen etsiminen peruskorjatun rakennuksen ja uudisrakennuksen hiilijalanjälkien keskinäiselle vertautumiselle on sinänsä toissijaista koska luotettavan vastauksen saaminen yksittäisen hankkeen osalle vaatii lopulta kuitenkin tapauskohtaisen hiilijalanjälkilaskennan. Tapauskohtaisuuden vuoksi vertailevaa hiilijalanjäljen laskentaa on hyvä tarjota asiakkaiden päätöksenteon tueksi, tehtäessä päätöksiä peruskorjausikäisten rakennusten jatkosta.

Opinnäytetyön suurimpina haasteina olivat valmiin laskentakohteen puuttuminen sekä se, että hiilijalanjäljen laskentaan ei ollut käytettävissä valmista laskentaohjelmaa. Laskentakohteen puuttuminen aiheutti lisätyötä, sillä laskentakohde määritettiin lopulta itse. Toki laskentakohteen pohjana käytettiin olemassa olevaa rakennusta eikä rakennuksen geometrian piirtämistä sinänsä tarvinnut aloittaa täysin tyhjältä pöydältä. Myös alkuperäisten rakennetyyppien määrittäminen vaati oman aikansa, sillä vaikka tyyppillisistä 1970-luvun rakenteista oli olemassa kokemuspohjaista tietoa, erityisesti rakennekerroksien paksuuksien määrittämiseksi tuli perehtyä rakennusaikakautta käsittelevään tutkimuskirjallisuuteen.

Hiilijalanjäljen laskennan osalta alkuperäisenä suunnitelmana oli hyödyntää laskentaan Ympäristöministeriön valmista Excel-pohjaista laskuria. Laskuria kokeiltaessa kävi kuitenkin ilmi, että laskurissa ei ollut käytettävissä kaikkia tarvittavia rakennusmateriaaleja. Toisaalta myöskään energian käytön hiilijalanjäljen laskentaan käytettäviä päästökertoimia ei voitu muokata, eikä energian hiilijalanjälkeä olisi voitu laskea Rakentamisen päästötietokannan uudemmilla kertoimilla. Tästä johtuen laskelmat tehtiin itse Excel-taulukkolaskentaohjelmalla, mikä osoittautui todella työlääksi. Mikäli työn tekemiseen olisi ollut valmis laskentakohde ja hiilijalanjäljen laskuri, olisi säästyneen ajan myötä voitu ottaa tarkasteluun useampia erilaisia rakennetyyppejä. Hyvänä puolena itse tekemisessä oli kuitenkin se, että sen myötä hiilijalanjäljen laskentaan tuli perehdyttyä tarkemmin ja toisaalta toimeksiantaja voi hyödyntää halutessaan työn ohessa tehtyä Excel-laskentapohjaa myös jatkossa.

Luotettavuus ja eettisyys

Opinnäytetyön luotettavuutta arvioitiin koko opinnäytetyöprosessin ajan. Luotettavuutta ylläpidettiin mm. käyttämällä aineiston osalla pääasiassa alkuperäislähteitä. Tietoperustan lähdeaineiston referoinnissa varmistettiin, että referointi ei muuttanut lähdeaineiston asiasisältöä eikä lähdeaineistossa esitettyjen tulosten ja/tai johtopäätösten varmuusaste muuttunut. Työn tulosten luotettavuuden näkökulmasta kriittisimmiksi kohdiksi arvioitiin määrälaskennan ja sen avulla tehdyn hiilijalanjäljen laskennan osuus erityisesti materiaalipäästöjen osalta. Hiilijalanjäljen laskenta ei sinänsä ollut kovinkaan haastavaa laskennan pohjatuessa pitkälti yksinkertaisiin päästökertoimilla ja määrälaskentatiedoilla tehtäviin kertolaskuihin. Koska työssä ei ollut kuitenkaan käytettävissä valmista laskentaohjelmaa ja kaikki laskenta tehtiin alusta alkaen itse Excelillä, laskentaan kohdistui riski inhimillisen virheen vääristämistä tuloksista. Valmiilla laskentaohjelmalla edellä mainitut virheet olisi voitu sulkea varmemmin pois, ja riski olisi rajautunut lähinnä määrälaskennan osalle ohjelman sisältäessä jo valmiiksi oikein määritetyt laskentakaavat. Edellä kuvatun riskin pienentämiseksi ja tulosten luotettavuuden parantamiseksi laskennan tulokset tarkistettiin useaan otteeseen. Laskentatulosten oikeellisuutta arvioitiin myös työn tietoperustassa käytetyn hiilijalanjäljen laskentaan liittyvän lähdeaineiston perusteella.

Toiseksi tulosten luotettavuuden kannalta kriittiseksi tekijäksi arvioitiin energialaskelmat, erityisesti rakennusosien johtumislämpöhäviöiden laskelmat. Johtumislämpöhäviöiden osalta laskenta

tehtiin käsin sekä D.O.F Lämpö -ohjelmalla, jolloin voitiin paremmin varmistua tulosten oikeellisuudesta. Hiilijalanjäljen laskentamenetelmän osalta luotettavuutta ylläpidettiin suorittamalla laskelmat johdonmukaisesti Ympäristöministeriön Vähähiilisen rakennuksen arviointimenetelmää noudattaen. Menetelmäohjeen mukaisesti arviointimenetelmällä saatavia hiilijalanjälkilaskennan tuloksia voidaan pitää lähtökohtaisesti luotettavina, kun noudatetaan Ympäristöministeriön menetelmäohjetta (Rakennuksen vähähiilisyyden arviointimenetelmä 2019, 36). Hiilijalanjäljen laskemiseen käytetyt materiaalien ja palveluiden päästötiedot haettiin pääasiassa Rakentamisen päästötietokannasta. Mikäli päästötietoja ei ollut saatavilla Rakentamisen päästötietokannasta, tiedot haettiin materiaalivalmistajien ympäristöselosteista.

Työn eettisyyden osalta opinnäytetyö ei sisältänyt lähtökohtaisesti kovinkaan haastavia puolia, sillä tutkimuksessa tutkittiin kuvitteellista rakennusta. Tutkimus ei sisältänyt tutkimusasetelmia, joiden perusteella olisi edellytetty eettistä ennakoarviointia eikä opinnäytetyö ei edellyttänyt tutkimuslupaa toimeksiantajalta (Eettinen toimikunta ja eettinen ennakoarviointi 2022). Opinnäytetyön alkuvaiheessa laadittiin sopimus opinnäytetyön tekemisestä allekirjoittaneen sekä toimeksiantajan ja Jyväskylän ammattikorkeakoulun kesken.

Kehittämisehdotukset ja jatkotoimenpiteet

Opinnäytetyön tuloksena saatiin vastauksia 1970-luvun opetusrakennuksen hiilijalanjäljen muodostumisesta rakennuksen elinkaaren aikana. Tulokset kuvaavat mm. opinnäytetyöhön valittujen alkuperäisten rakennetyyppien korjauksesta aiheutuvaa hiilijalanjälkeä, kun rakenteet korjataan luvussa 6.2 esitetyn mukaisesti. Tuloksia voidaan hyödyntää case-esimerkkinä peruskorjattavan rakennuksen elinkaaren hiilijalanjäljen muodostumisesta esimerkiksi asiakastapaamisissa, sillä tulokset kuvaavat hyvin rakennuksen hiilijalanjäljen muodostumisen lainalaisuuksia, alleviivaten mm. energian käytön merkittävää osuutta rakennusten hiilijalanjäljestä. Opinnäytetyön pohjalta on kuitenkin tunnistettavissa myös kehittämiskohteita ja jatkotutkimustarpeita.

Tärkeimpänä kehittämiskohteena on laskennan tarkkuuden parantaminen. Opinnäytetyössä rakennuksen hiilijalanjäljen laskentaan käytettiin taulukkoarvoja Vähähiilisyyden arviointimenetelmän mahdollistamissa rajoissa. Taulukkoarvoja käyttämällä laskennan tulosta voitiin verrata paremmin uudisrakennuksen hiilijalanjäljen vertailutiedoiksi valittujen tutkimusten tulosten kanssa

(Huuhka ym. 2021 ja Bionova Oy 2021) ja toisaalta opinnäytetyön laajuus pysyi paremmin hallittavana, kun laskenta toteutettiin kuitenkin ilman valmista laskuria. Taulukkoarvojen käyttäminen tekee laskentatuloksesta kuitenkin enemmän suuntaa-antavan kuin tarkan erityisesti laskennan niiltä osin missä taulukkoarvoja käytetään. Laskennan tarkkuutta voisi siis parantaa laskemalla kaikki elinkaaren vaiheet ilman taulukkoarvoja. Suositeltavampana vaihtoehtona jatkossa näkisin kuitenkin sen, että hiilijalanjäljen laskentaan käytettäisiin valmista laskentaohjelmaa, sillä samalla laskennan luotettavuus paranisi inhimillisten laskentavirheiden riskin pienentyessä. Valmista laskentaohjelmaa käytettäessä aikaa voitaisiin käyttää laskentakaavojen teon sijaan olennaisempiin asioihin, kuten tarvittavien hiilijalanjäljen laskentaskenaarioiden miettimiseen.

Jatkotutkimuksena olisi hyvä tehdä lisää hiilijalanjäljen laskentaa erilaisten rakennetyyppien peruskorjauksen hiilijalanjäljen hahmottamiseksi. Tutkimusta voisi jatkaa esimerkiksi opinnäytetyön laskentakohteen geometrialla ja perustiedoilla mutta korjattaviksi rakenteiksi valittaisiin muita 1970-luvun tyyppillisiä rakennetyyppejä. Vaihtoehtoisesti jatkotutkimuksina voisi olla opinnäytetyötä vastaavien hiilijalanjäljen laskelmien tekeminen eri aikakausien rakennuksiin, laskelmien myötä saataisiin laajempaa käsitystä mittavan peruskorjausten vaikutuksista eri aikakauden rakennusten hiilijalanjälkeen.

Lähteet

About greenhouse gases. 2022. ICOS Integrated Carbon Observation System. Viitattu 12.9.2022. <https://www.icos-cp.eu/science-and-impact/climate-change/ghgs>.

Betoni rakennusmateriaalina. 2022. Betoniteollisuus ry. Viitattu 18.10.2022. <https://betoni.com/tietoa-betonista/perustietopaketti/betoni-rakennusmateriaalina/>.

Betonin vaurioituminen. 2022. Betoniteollisuus ry. Viitattu 1.11.2022. <https://betoni.com/tietoa-betonista/ominaisuudet-ja-edut/betonin-vaurioituminen/>.

Buildings. 2022. IEA International Energy Agency. Viitattu 25.9.2022. <https://www.iea.org/topics/buildings>.

Carbon Footprint Limits for Common Building Types. 2021. Bionova Oy. Viitattu 2.4.2023. <https://mrluudistus.fi/uutiset/selvityksia-mrln-vaikutusten-arvioinneista/>.

Cement. Tracking report. 2022. IEA International Energy Agency. Viitattu 22.10.2022. <https://www.iea.org/reports/cement>.

Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the IPCC Sixth Assessment Report. Julkaistu 4.4.2022. IPCC. Viitattu 12.9.2022. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Chapter03.pdf.

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. 2015. IPCC. Viitattu 17.9.2022. https://ar5-syr.ipcc.ch/ipcc/ipcc/resources/pdf/IPCC_SynthesisReport.pdf.

Eduskunta hyväksyi rakentamisen päästöjä pienentävät ja digitalisaatiota edistävät lait. 2023. Ympäristöministeriö. Viitattu 23.4.2023. <https://valtioneuvosto.fi/-/1410903/eduskunta-hyvakysi-rakentamisen-paastoja-pienentavat-ja-digitalisaatiota-edistavat-lait>.

Elinkaariarviointi, jalanjäljet, panos-tuotosmalli. Julkaistu 6.11.2013. Suomen ympäristökeskus SYKE. Viitattu 4.1.2023. https://www.ymparisto.fi/fi-fi/kulutus_ja_tuotanto/tuotesuunnittelu_ja_tuotteet/elinkaariarviointi_jalanjaljet_ja_panostuotosmalli.

Energiatehokkuus – Rakennuksen energiankulutuksen ja lämmitystehotarpeen laskenta. 2017. Ympäristöministeriö. Viitattu 28.3.2023. <https://ym.fi/documents/1410903/0/Ohje+-+Rakennuksen+energiankulutuksen+ja+l%C3%A4mmitystehotarpeen+laskenta+20-12-2017.pdf/3efb5c34-e921-592e-3d54-aaf9ecc1b62e/Ohje+-+Rakennuksen+energiankulutuksen+ja+l%C3%A4mmitystehotarpeen+laskenta+20-12-2017.pdf?t=1647934666563>.

EN 15978:2011 Sustainability of construction works – Assessment of environmental performance of buildings – Calculation method. 2012. European Standard.

EU:n ratkaisut ilmastonmuutoksen ehkäisemiseksi. 2022. Euroopan parlamentti. Viitattu 18.9.2022. <https://www.europarl.europa.eu/news/fi/headlines/society/20180703STO07129/eu-n-ratkaisut-ilmastonmuutoksen-ehkaisuiseksi>.

Fenomenologinen analyysi. 2022. Jyväskylän yliopiston Koppa. Viitattu 23.1.2023. <https://koppa.jyu.fi/avoimet/hum/menetelmapolkuja/menetelmapolku/aineiston-analyysimenetelmät/fenomenologinen-analyysi>.

Global Material Resources Outlook to 2060 – Economic Drivers and Environmental Consequences. Julkaistu 22.10.2018. Organisation for Economic Co-operation and Development OECD. Viitattu 25.9.2022. <https://www.oecd.org/environment/waste/highlights-global-material-resources-outlook-to-2060.pdf>.

Hallituksen ilmastopolitiikka: Kohti hiilineutraalia Suomea 2035. N.d. Ympäristöministeriö. Viitattu 28.1.2023. <https://ym.fi/hiilineutraalisuomi2035>.

Hermeneuttinen analyysi. 2022. Jyväskylän yliopiston Koppa. Viitattu 23.1.2023. <https://koppa.jyu.fi/avoimet/hum/menetelmapolkuja/menetelmapolku/aineiston-analyysimenetelmät/hermeneuttinen-analyysi>.

Hiilineutraali Suomi 2035 – kansallinen ilmasto- ja energiasstrategia. Julkaistu 9.9.2022. Työ- ja elinkeinoministeriö. Viitattu 9.10.2022. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-327-811-0>.

Huuhka, S., Vainio, T., Moisio, M., Lampinen, E., Knuutinen, M., Bashmakov, S., Köliö, A., Lahdensivu, J., Ala-Kotila P. & Lahdenperä, P. 2021. Purkaa vai korjata? Hiilijalanjälkivaikutukset, elinkaarikustannukset ja ohjauskeinot. Ympäristöministeriön julkaisuja p. 9/2021. Ympäristöministeriö. Viitattu 6.12.2022. ISBN 978-952-361-221-1 (PDF).

Ilmastonmuutoksen syyt. 2022. Euroopan komissio. Viitattu 12.9.2022. https://ec.europa.eu/clima/climate-change/causes-climate-change_fi#kasvihuonekaasut.

Ilmastaselvitys. N.d. Ympäristöministeriö. Viitattu 23.1.2023. <https://ym.fi/hankesivu?tunnus=YM027:00/2021>.

In focus: Energy efficiency in buildings. Julkaistu 17.1.2020. European Commission. Viitattu 25.9.2022. https://ec.europa.eu/info/news/focus-energy-efficiency-buildings-2020-lut-17_en.

Infrarakentamisen hiilijalanjälki haltuun tietoa hyödyntämällä. Julkaistu 9.12.2022. Väylävirasto. Viitattu 19.12.2022. <https://vayla.fi/-/infrarakentamisen-hiilijalanjalki-haltuun-tietoa-hyodyntamalla>.

Johdatus rakennusten elinkaariarviointiin. N.d. Ympäristöministeriö. Viitattu 4.1.2023. https://elinkaari-laskenta.fi/wp-content/uploads/sites/6/2019/08/johdatus_rakennusten_elinkaariarviointiin.pdf.

Kasvihuonekaasut. 2022. Ilmatieteenlaitos. Viitattu 12.9.2022. <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/kasvihuonekaasujen-tutkimus>.

Koskela, S., Sokka, L., Korhonen, M., Mattila, T. & Soimakallio, S. 2010. Elinkaariarviointi ja sen käyttö. Julkaisussa Elinkaarimetodiikkojen nykytila, hyvät käytännöt ja kehitystarpeet. Suomen Ympäristökeskuksen raportteja p. 7/2010. Toim. R. Antikainen. Helsinki: Suomen ympäristökeskus, 17. Viitattu 2.1.2023. ISBN 978-952-11-3734-1 (PDF).

Kuittinen, M. 2023. Mitä puutuotteille tarkoittaa ilmastaselvitys uudessa rakennuslaissa? Kuinka uusi rakentamislaki vaikuttaa puutuotealaan? -webinaarisarjan osa 2. Suomen metsäkeskus. YouTube-videopalvelu. Viitattu 23.4.2023. <https://www.youtube.com/watch?v=guo-5ipqyY0>.

Laine, A., Raivio, T., Jonsson, H., Heino, A., Klimscheffskij, M. & Lehtomäki, J. 2020. Vähähiilinen rakennusteollisuus 2035 – Osa 1. Rakennetun ympäristön elinkaaren nykytila. Gaia Consulting Oy. Viitattu 15.10.2022. https://www.rakennusteollisuus.fi/globalassets/ymparisto-ja-energia/vahahii-lisyys/rt-hiilitiekartta_rakennetun-ympariston-hiilielinkaaren-nykytila-lopullinen-luonnos-20.3.pdf.

Laki hiilen energiakäytön kieltämisestä 416/2019. Julkaistu 29.3.2019. Työ- ja elinkeinoministeriö. Viitattu 9.10.2022. <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2019/20190416>.

Laskentapalvelut.fi. N.d. Verkkosivun etusivu. Viitattu 27.3.2023. https://www.laskentapalvelut.fi/index_for_JRF.php.

Leveelahti, U. 2022. Kiertotalous tuo hiilipihin sementin ja laittaa hiilidioksidin kiertoon. Betoni-lehti. p. 2/2022. Betoniteollisuus ry. Viitattu 30.10.2022. https://betoni.com/lehti/wp-content/uploads/sites/4/2022/05/BET2202_72-83.pdf.

Lämpö – Rakennusfysiikkaa rakennusinsinööreille. Rafnet 2020-oppimateriaalin teoriaosia L (lämpö). Ympäristöministeriö. Viitattu 13.3.2023. <https://tilatjaterveys.fi/ohjelma/oppaita-ja-selvitkyksia>.

Maarakentamisen uusiomateriaalit. Ympäristökelpoisuuden osoittaminen ja tuotteistaminen. 2011. Ympäristöministeriö. Viitattu 29.10.2022. ISBN 978-952-11-3862-1 (PDF).

Mattila, V. 4.3.2022. Kolmossementti vie ympäristöloikkaan. Betoni-verkkolehti. Viitattu 29.10.2022. <https://betoni.com/lehti/ajankohtaista/kolmossementti-vie-ymparistoloikkaan/>

Mitä nämä käsitteet tarkoittavat? 2022. Sitra. Viitattu 13.9.2022. <https://www.sitra.fi/artikkelit/mita-nama-kasitteet-tarkoittavat/>

Mäkiö, E., Malinen, M., Neuvonen, P., Vikström, K., Mäenpää, R., Saarenpää, R. & Tähti, E. 2016. Kerrostalot 1960–1975. Rakennustieto. Viitattu 5.3.2023. ISBN 9789522671189.

Nurmi, S. 2012. Massiivirakenteen sisäpuolisen lämmöneristämisen vaikutus rakenteen kosteustekniseen toimintaan. Diplomityö. Rakennustekniikan koulutusohjelma. Tampereen teknillinen yliopisto. Viitattu 14.12.2022. <https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/123456789/21129/Nurmi.pdf?sequence=3&isAllowed=y>.

Paris Agreement. 2015. United Nations. Viitattu 18.9.2022. https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf.

Polttoaineluokitus 2022. 2022. Excel-taulukko. Tilastokeskus. Viitattu 8.10.2022.
https://www.stat.fi/tup/khkinv/khkaasut_polttoaineluokitus.html.

Punkki, J. 2021. Betonin sideaineet tulevaisuudessa. Betoni-lehti. p. 4/2021 p. 74–83. Betoniteollisuus ry. Viitattu 29.10.2022. <https://betoni.com/lehti/betonilehti/4-2021/>

Raivio, T., Laine, A., Klimscheffskij, M., Lehtomäki, J., Heino, A., Jonsson, H., Pokela, P. & Ahlfors, M. 2020. Vähähiilinen rakennusteollisuus 2035 – Osa 2. Vähähiilisyyden mahdollisuuksien tarkastelu. Gaia Consulting Oy. Viitattu 19.10.2022. https://www.rakennusteollisuus.fi/globalassets/ymparisto-ja-energia/vahahiilisyyys/rt-raportti-2_vahahiilisyyys_lopullinen.pdf.

Rakennusten energiatehokkuus – Määräykset ja ohjeet 2012. 2011. D3 Suomen rakentamismääräyskokoelma. Ympäristöministeriö. Viitattu 28.3.2023. <https://www.edilex.fi/rakentamismaaraykset/kumotut>

Rakennettu ympäristö ja ilmastonmuutos. N.d. Rakennusteollisuus RT ry. Viitattu 23.1.2023. <https://www.rt.fi/Tietoa-alasta/Ilmasto-ymparisto-ja-energia/Materiaalitehokkuus/>.

Rakennuksen vähähiilisyyden arviointimenetelmä. 2019. Ympäristöministeriö. Viitattu 18.9.2022. https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/161761/YM_2019_22_Rakennuksen_vahahiilisyyden_arviointimenetelma.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

Rakennuskannan ikäjakauma. 2022. Rakennusteollisuus RT ry. Viitattu 23.1.2023. <https://www.rt.fi/Tietoa-alasta/Talous-tilastot-ja-suhdanteet/Kuviopankki/>.

Rakennusten energiatehokkuus: EU-parlamentti hyväksyi kantansa. 2023. Euroopan parlamentti. Viitattu 10.4.2023. <https://www.europarl.europa.eu/news/fi/press-room/20230310IPR77228/rakennusten-energiatehokkuus-eu-parlamentti-hyvaksyi-kantansa>.

Rakentamisen päästötietokanta. 2022. Suomen ympäristökeskus. Viitattu 14.9.2022. <https://www.co2data.fi/>

RT 10-11284. 2017. Hankkeen johtamisen ja rakennuttamisen tehtäväluettelo HJR18. RT-ohjekortti. Rakennustieto Oy. Viitattu 10.11.2022. <https://kortistot.rakennustieto.fi/kortit/RT%2010-11284>.

RT 18-10922. 2008. Kiinteistön tekniset käyttöiät ja kunnossapitojaksot. RT-ohjekortti. Rakennustieto Oy. Viitattu 12.13.2023. <https://kortistot.rakennustieto.fi/kortit/RT%2018-10922>.

Ruuska, A. & Häkkinen, T. 2015. The significance of various factors for GHG emissions of buildings. International Journal of Sustainable Engineering. Viitattu 17.11.2022. <https://doi.org/10.1080/19397038.2014.934931>.

Ruuska, A. & Häkkinen, T. 2013. Rakennusmateriaalien ympäristövaikutukset – taustaraportti. Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy. Viitattu 17.11.2022. https://publications.vtt.fi/julkaisut/muut/2013/YM_Taustaraportti.pdf.

Ruuska, A., Häkkinen, T., Vares, S., Korhonen, M. & Myllymaa, T. 2013. Rakennusmateriaalien ympäristövaikutukset. Ympäristöministeriön raportteja p. 8/2013. Ympäristöministeriö. Viitattu 17.11.2022. ISBN 978-952-11-4154-6 (PDF).

Röck, M., Ruschi Mendes Saade, M., Balouktsi, M., Nygaard Rasmussen, F., Birgisdottir, H., Frischknecht, R., Habert, G., Lützkendorf, T. & Passer, A. 2020. Embodied GHG emissions of buildings – The hidden challenge for effective climate change mitigation. Artikkel julkaisussa Applied Energy. Julkaisu nro. 258. Elsevier Ltd. Viitattu 9.10.2022. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114107>

Sementin valmistus. 2022. Finnsementti. Viitattu 22.10.2022. <https://finnsementti.fi/palvelut/tietoa-sementista/valmistus/>

Sokka, L., Correia, S. & Koljonen, S. 2018. Lämmityspolttoaineiden tuotannon elinkaariset kasvi-huonekaasupäästöt. Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy. Viitattu 8.10.2022. <https://publications.vtt.fi/pdf/technology/2018/T336.pdf>.

Somers, J. 2022. Technologies to decarbonize the EU steel industry. European Commission, Joint Research Centre. Viitattu 5.11.2022. <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC127468>.

Summary for Policymakers. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. 2021. IPCC. Viitattu 18.9.2022. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SPM.pdf.

Suonketo, J. & Annala, P. N.d. 1970-luvun koulutalo – rakenteet ja niiden peruskorjaustarve. Tampereen teknillinen yliopisto (TTY), Rakennustekniikan laitos. Viitattu 11.3.2023. <http://www.koulu-rakennus.fi/1970-luvun-koulu/rakenteet#viite>.

Säynäjoki, A., Heinonen, J. & Junnila, S. 2012. A scenario analysis of the life cycle greenhouse gas emissions of a new residential area. Environmental Research Letters, 7, 3. Viitattu 13.10.2022. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/7/3/034037/pdf>.

Tapaustutkimus. 2022. Jyväskylän Yliopiston Koppa. Viitattu 22.1.2023. <https://koppa.jyu.fi/avoimet/hum/menetelmapolkuja/menetelmapolku/tutkimusstrategiat/tapaustutkimus>.

Teräs – perustietoa arkkitehtiopiskelijalle. 2007. TKK Arkkitehtiosasto. Viitattu 23.10.2022. https://www.terasrakenneyhdistys.fi/document/1/40/66e53a5/Teras_web.pdf.

Teräskirja. 2014. Metallinjalostajat ry. Viitattu 23.10.2022. https://teknologiateollisuus.fi/sites/default/files/teraskirja_flip/mobile/index.html#p=3.

The role of cement in the 2050 low carbon economy. 2013. Cembureau The European Cement Association. Viitattu 31.10.2022. https://cembureau.eu/media/cpvoin5t/cembureau_2050roadmap_lowcarboneyconomy_2013-09-01.pdf.

Tietoa sementtistabiloinnista. 2022. Finnsementti. Viitattu 20.11.2022. <https://finnsementti.fi/palvelut/tietoa-sementista/tietoa-sementin-stabiloinnista/>.

Toikko, T. & Rantanen, T. 2009. Tutkimuksellinen kehittämistoiminta. Tampereen Yliopistopaino Oy. Viitattu 23.1.2023. https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/10024/100802/Toikko_Rantanen_Tutkimuksellinen_kehittamistoiminta.pdf.

Tulevaisuussanasto – hiilijalanjälki. 2022. Sitra. Viitattu 14.9.2022. <https://www.sitra.fi/tulevaisuussanasto/hiilijalanjalki/>

Tulevaisuussanasto – kasvihuonekaasu. 2022. Sitra. Viitattu 12.9.2022. <https://www.sitra.fi/tulevaisuussanasto/kasvihuonekaasu/>

Understanding Global Warming Potentials. 2022. United States Environmental Protection Agency. Viitattu 17.9.2022. <https://www.epa.gov/ghgemissions/understanding-global-warming-potentials>.

Vares, S., Häkkinen, T. & Vainio, T. 2017. Rakentamisen hiilivarasto. Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy. Viitattu 1.11.2022. <http://www.ym.fi/download/noname/%7B2859F537-ECD2-479D-A62B-F13AD75403F2%7D/136827>.

Vinha, J., Laukkanen, A., Mäkitalo, M., Nurmi, S., Huttunen, P., Pakkanen, T., Kero, P., Manelius, E., Lahdensivu, J., Köliö, A., Lähdesmäki, K., Piironen, J., Kuhno, V., Pirinen, M., Aaltonen, A., Suonketo, J., Jokisalo, J., Teriö, O., Koskenvesa, A & Palolahti, T. 2013. Ilmastonmuutoksen ja lämmöneristykseen lisäyksen vaikutukset vaipparakenteiden kosteusteknisessä toiminnassa ja rakennusten energiankulutuksessa. Tampereen teknillinen yliopisto. Rakennustekniikan laitos. Tutkimusraportti 159. Viitattu 4.12.2022. ISBN 978-952-15-2949-8 (PDF).

Vähähiilinen rakennusteollisuus 2035 – Osa 4. Rakennusteollisuuden ja rakennetun ympäristön vähähiilisyyden tiekartta 2020 - 2035 - 2050. 2020. Gaia Consulting Oy. Viitattu 24.10.2022. https://www.rakennusteollisuus.fi/globalassets/ymparisto-ja-energia/vahahiilisyyys_uudet/rt_4.-raportti_vahahiilisyyden-tiekartta_lopullinen-versio_clean.pdf.

Vähähiilisen rakentamisen tiekartta. 2022. Ympäristöministeriö. Viitattu 6.9.2022. <https://ym.fi/vahahiilisen-rakentamisen-tiekartta>.

Weijo, I., Lahdensivu, J., Turunen, T., Ahola, S., Sistonen, E., Vornanen-Winqvist, C. & Annala, P. 2019. Kosteus- ja mikrobivaurioituneiden rakennusten korjaus. Ympäristöministeriön julkaisuja p. 18/2019. Ympäristöministeriö. Viitattu 12.3.2023. ISBN: 978-952-361-024-8 (PDF).

World Steel in Figures. 2022. World Steel Association. Viitattu 23.10.2022. <https://world-steel.org/steel-topics/statistics/world-steel-in-figures-2022/>

Ympäristöministeriön asetus asuin-, majoitus- ja työtiloista 1008/2017. Julkaistu 20.12.2017. Ympäristöministeriö. Viitattu 4.3.2023. <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2017/20171008>.

Ympäristöministeriön asetus rakennuksen energiatehokkuuden parantamisesta korjaus- ja muutostöissä 4/13. Julkaistu 27.2.2013. Ympäristöministeriö. Viitattu 25.9.2022. <https://www.finlex.fi/fi/viranomaiset/normi/700001/40799>.

Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen energiatehokkuudesta 1010/2017. Julkaistu 20.12.2017. Ympäristöministeriö. Viitattu 22.11.2022. <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2017/20171010#Pidm45053758676624>.

Ympäristöraportti. 2022. Finnsementti Oy. Viitattu 23.10.2022. <https://finnsementti.fi/wp-content/uploads/Ymparistoraportti-Finnsementti-2022-1.pdf>.

Zimmermann, R. K., Andersen, C. M. E., Kanafani, K., & Birgisdottir, H. 2021. Whole Life Carbon Assessment of 60 buildings: Possibilities to develop benchmark values for LCA of buildings. Polyteknisk Boghandel og Forlag. BUILD Report, 2021, 12. Viitattu 16.10.2022. <https://sbi.dk/Pages/Whole-Life-Carbon-Assessment-of-60-buildings.aspx>.

Kaukolämmön kulutus [kWh]	259696					
Sähkön kulutus [kWh]	102024					
Lämmitetty nettoala [m ²]	2416					
Käyttöikä [a]	50					
	vuosi	kaukolämpö	sähkö	vuosi	kaukolämpö	sähkö
Vuosittaiset päästökertoimet [kgCO ₂ /kWh]	2023	0,137	0,134	2051	0,052	0,044
	2024	0,134	0,127	2052	0,049	0,043
	2025	0,131	0,121	2053	0,047	0,042
	2026	0,127	0,115	2054	0,044	0,041
	2027	0,124	0,108	2055	0,042	0,040
	2028	0,121	0,102	2056	0,039	0,038
	2029	0,117	0,095	2057	0,037	0,037
	2030	0,114	0,089	2058	0,034	0,036
	2031	0,111	0,086	2059	0,032	0,035
	2032	0,108	0,083	2060	0,029	0,034
	2033	0,104	0,080	2061	0,028	0,033
	2034	0,101	0,077	2062	0,027	0,032
	2035	0,098	0,074	2063	0,027	0,030
	2036	0,095	0,071	2064	0,026	0,029
	2037	0,092	0,068	2065	0,025	0,028
	2038	0,088	0,065	2066	0,024	0,027
	2039	0,085	0,062	2067	0,023	0,026
	2040	0,082	0,059	2068	0,023	0,024
	2041	0,079	0,058	2069	0,022	0,023
	2042	0,076	0,056	2070	0,021	0,022
	2043	0,074	0,055	2071	0,020	0,021
	2044	0,071	0,053	2072	0,020	0,021
	2045	0,068	0,052	2073	0,019	0,020
	2046	0,065	0,051			
	2047	0,062	0,049			
	2048	0,060	0,048			
	2049	0,057	0,046			
	2050	0,054	0,045			

KAUKOLÄMMÖN PÄÄSTÖT	vuosi	vuodessa [kgCO ₂ e]	kumulatiivinen [kgCO ₂ e]	vuosi	vuodessa [kgCO ₂ e]	kumulatiivinen [kgCO ₂ e]
	2023	35604	35604	2054	11427	733745
	2024	34747	70351	2055	10777	744522
	2025	33890	104242	2056	10128	754650
	2026	33033	137275	2057	9479	764129
	2027	32176	169451	2058	8830	772959
	2028	31319	200771	2059	8180	781139
	2029	30462	231233	2060	7531	788670
	2030	29605	260838	2061	7323	795994
	2031	28774	289613	2062	7116	803110
	2032	27943	317556	2063	6908	810017
	2033	27112	344668	2064	6700	816718
	2034	26281	370949	2065	6492	823210
	2035	25450	396400	2066	6285	829495
	2036	24619	421019	2067	6077	835572
	2037	23788	444807	2068	5869	841441
	2038	22957	467764	2069	5661	847102
	2039	22126	489890	2070	5454	852556
	2040	21295	511185	2071	5298	857853
	2041	20568	531753	2072	5142	862995
	2042	19841	551594	2073	4986	867982
	2043	19114	570708	Yhteensä		867982
	2044	18386	589094	[kgCO ₂ /m ² /a]		7,19
	2045	17659	606753			
	2046	16932	623686			
	2047	16205	639891			
	2048	15478	655369			
	2049	14751	670119			
	2050	14024	684143			
	2051	13374	697517			
	2052	12725	710242			
	2053	12076	722318			

SÄHKÖN PÄÄSTÖT	vuosi	vuodessa [kgCO ₂ e]	kumulatiivinen [kgCO ₂ e]	vuosi	vuodessa [kgCO ₂ e]	kumulatiivinen [kgCO ₂ e]
	2023	13651	13651	2054	4142	234472
	2024	12998	26649	2055	4030	238502
	2025	12345	38994	2056	3918	242419
	2026	11692	50686	2057	3805	246225
	2027	11039	61725	2058	3693	249918
	2028	10386	72111	2059	3581	253499
	2029	9733	81844	2060	3469	256968
	2030	9080	90924	2061	3346	260314
	2031	8774	99698	2062	3224	263538
	2032	8468	108166	2063	3102	266640
	2033	8162	116328	2064	2979	269619
	2034	7856	124184	2065	2857	272476
	2035	7550	131734	2066	2734	275210
	2036	7244	138977	2067	2612	277822
	2037	6938	145915	2068	2489	280311
	2038	6632	152546	2069	2367	282678
	2039	6325	158872	2070	2245	284923
	2040	6019	164891	2071	2173	287096
	2041	5877	170768	2072	2102	289197
	2042	5734	176502	2073	2030	291228
	2043	5591	182093	Yhteensä		291228
	2044	5448	187541	[kgCO ₂ /m ² /a]		2,41
	2045	5305	192846			
	2046	5162	198008			
	2047	5020	203028			
	2048	4877	207905			
	2049	4734	212639			
	2050	4591	217230			
	2051	4479	221709			
	2052	4367	226075			
	2053	4254	230330			

TULOSTEN KOONTI	[kgCO ₂ e/m ² /a]
Materiaalit A1-A3	2,48
Talotekniikan päästöt A1-A3	1,22
Kuljetus työmaalle A4	0,20
Työmaatoiminnot A5	0,55
Korjaukset ja vaihdot B3-B4	0,36
Talotekniikan päästöt B3-B4	0,64
Energia B6	9,60
Purku- ja jätteenkäsittely C1-C4	0,67
HIILIJALANJÄLKI VUODESSA 50 V ELINKAAREN AIKANA	15,72

AP ENERGIAN PÄÄSTÖT	vuosi	vuodessa [kgCO ₂ e]	kumulatiivinen [kgCO ₂ e]	vuosi	vuodessa [kgCO ₂ e]	kumulatiivinen [kgCO ₂ e]
	2023	3878	3878	2054	1245	79917
	2024	3785	7663	2055	1174	81090
	2025	3691	11354	2056	1103	82194
	2026	3598	14952	2057	1032	83226
	2027	3505	18456	2058	962	84188
	2028	3411	21867	2059	891	85079
	2029	3318	25185	2060	820	85899
	2030	3224	28410	2061	798	86696
	2031	3134	31544	2062	775	87471
	2032	3043	34587	2063	752	88224
	2033	2953	37540	2064	730	88954
	2034	2862	40402	2065	707	89661
	2035	2772	43174	2066	684	90345
	2036	2681	45856	2067	662	91007
	2037	2591	48447	2068	639	91646
	2038	2500	50947	2069	617	92263
	2039	2410	53357	2070	594	92857
	2040	2319	55676	2071	577	93434
	2041	2240	57916	2072	560	93994
	2042	2161	60077	2073	543	94537
	2043	2082	62159	Yhteensä		94537
	2044	2003	64162	[kgCO ₂ /m ² /a]		0,78
	2045	1923	66085			
	2046	1844	67929	A1-A3 + B6		1,35
	2047	1765	69694	A1-A3		0,57
	2048	1686	71380	B6		0,78
	2049	1607	72987			
	2050	1527	74514			
	2051	1457	75971			
	2052	1386	77357			
	2053	1315	78672			

OVET ENERGIAN PÄÄSTÖT	vuosi	vuodessa [kgCO ₂ e]	kumulatiivinen [kgCO ₂ e]	vuosi	vuodessa [kgCO ₂ e]	kumulatiivinen [kgCO ₂ e]
	2023	351	351	2054	113	7228
	2024	342	693	2055	106	7334
	2025	334	1027	2056	100	7434
	2026	325	1352	2057	93	7527
	2027	317	1669	2058	87	7614
	2028	308	1978	2059	81	7695
	2029	300	2278	2060	74	7769
	2030	292	2570	2061	72	7841
	2031	283	2853	2062	70	7911
	2032	275	3128	2063	68	7979
	2033	267	3395	2064	66	8045
	2034	259	3654	2065	64	8109
	2035	251	3905	2066	62	8171
	2036	242	4147	2067	60	8231
	2037	234	4382	2068	58	8288
	2038	226	4608	2069	56	8344
	2039	218	4826	2070	54	8398
	2040	210	5035	2071	52	8450
	2041	203	5238	2072	51	8501
	2042	195	5433	2073	49	8550
	2043	188	5622	Yhteensä		8550
	2044	181	5803	[kgCO ₂ /m ² /a]		0,07
	2045	174	5977			
	2046	167	6144	A1-A3 + B6		0,10
	2047	160	6303	A1-A3		0,03
	2048	152	6456	B6		0,07
	2049	145	6601			
	2050	138	6739			
	2051	132	6871			
	2052	125	6996			
	2053	119	7115			

IKKUNAT ENERGIAN PÄÄSTÖT	vuosi	vuodessa [kgCO ₂ e]	kumulatiivinen [kgCO ₂ e]	vuosi	vuodessa [kgCO ₂ e]	kumulatiivinen [kgCO ₂ e]
	2023	5390	5390	2054	1730	111072
	2024	5260	10650	2055	1631	112704
	2025	5130	15780	2056	1533	114237
	2026	5000	20781	2057	1435	115672
	2027	4871	25651	2058	1337	117009
	2028	4741	30392	2059	1238	118247
	2029	4611	35004	2060	1140	119387
	2030	4482	39485	2061	1109	120496
	2031	4356	43841	2062	1077	121573
	2032	4230	48071	2063	1046	122618
	2033	4104	52175	2064	1014	123633
	2034	3978	56154	2065	983	124615
	2035	3853	60006	2066	951	125567
	2036	3727	63733	2067	920	126487
	2037	3601	67334	2068	888	127375
	2038	3475	70809	2069	857	128232
	2039	3349	74158	2070	826	129058
	2040	3224	77382	2071	802	129860
	2041	3114	80496	2072	778	130638
	2042	3003	83499	2073	755	131393
	2043	2893	86392	Yhteensä		131393
	2044	2783	89176	[kgCO₂/m²/a]		1,09
	2045	2673	91849			
	2046	2563	94412	A1-A3 + B6		1,22
	2047	2453	96865	A1-A3		0,13
	2048	2343	99208	B6		1,09
	2049	2233	101441			
	2050	2123	103564			
	2051	2025	105588			
	2052	1926	107515			
	2053	1828	109343			

US ENERGIAN PÄÄSTÖT	vuosi	vuodessa [kgCO ₂ e]	kumulatiivinen [kgCO ₂ e]	vuosi	vuodessa [kgCO ₂ e]	kumulatiivinen [kgCO ₂ e]
	2023	3922	3922	2054	1259	80826
	2024	3828	7750	2055	1187	82013
	2025	3733	11483	2056	1116	83129
	2026	3639	15122	2057	1044	84173
	2027	3544	18666	2058	973	85146
	2028	3450	22116	2059	901	86047
	2029	3356	25472	2060	830	86877
	2030	3261	28733	2061	807	87683
	2031	3170	31903	2062	784	88467
	2032	3078	34981	2063	761	89228
	2033	2987	37967	2064	738	89966
	2034	2895	40862	2065	715	90681
	2035	2803	43666	2066	692	91374
	2036	2712	46378	2067	669	92043
	2037	2620	48998	2068	647	92690
	2038	2529	51527	2069	624	93313
	2039	2437	53964	2070	601	93914
	2040	2346	56310	2071	584	94497
	2041	2266	58576	2072	566	95064
	2042	2186	60761	2073	549	95613
	2043	2105	62867	Yhteensä		95613
	2044	2025	64892	[kgCO₂/m²/a]		0,79
	2045	1945	66837			
	2046	1865	68703	A1-A3 + B6		1,05
	2047	1785	70488	A1-A3		0,25
	2048	1705	72193	B6		0,79
	2049	1625	73817			
	2050	1545	75362			
	2051	1473	76836			
	2052	1402	78237			
	2053	1330	79567			

YP ENERGIAN PÄÄSTÖT	vuosi	vuodessa [kgCO ₂ e]	kumulatiivinen [kgCO ₂ e]	vuosi	vuodessa [kgCO ₂ e]	kumulatiivinen [kgCO ₂ e]
	2023	3567	3567	2054	1145	73519
	2024	3482	7049	2055	1080	74599
	2025	3396	10444	2056	1015	75614
	2026	3310	13754	2057	950	76564
	2027	3224	16978	2058	885	77448
	2028	3138	20116	2059	820	78268
	2029	3052	23169	2060	755	79023
	2030	2966	26135	2061	734	79756
	2031	2883	29018	2062	713	80469
	2032	2800	31818	2063	692	81162
	2033	2717	34535	2064	671	81833
	2034	2633	37168	2065	651	82483
	2035	2550	39718	2066	630	83113
	2036	2467	42185	2067	609	83722
	2037	2384	44568	2068	588	84310
	2038	2300	46869	2069	567	84877
	2039	2217	49086	2070	546	85424
	2040	2134	51219	2071	531	85955
	2041	2061	53280	2072	515	86470
	2042	1988	55268	2073	500	86970
	2043	1915	57183	Yhteensä		86970
	2044	1842	59026	[kgCO ₂ /m ² /a]		0,72
	2045	1769	60795			
	2046	1697	62492	A1-A3 + B3-B4 + B6		1,56
	2047	1624	64115	A1-A3		0,77
	2048	1551	65666	A1-A3 + B3-B4		0,84
	2049	1478	67144	B6		0,72
	2050	1405	68549	B3-B4		0,07
	2051	1340	69889			
	2052	1275	71164			
	2053	1210	72374			