

Tiia-Lotta Tuominen

**PURKAVAN UUDIS- JA KORJAUSRA-
KENTAMISEN ELINKAAREN AIKAISET
CO₂-PÄÄSTÖT TOIMISTORAKENNUK-
SESSA**

Diplomityö
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Lokakuu 2021

TIIVISTELMÄ

Tiia-Lotta Tuominen: Purkavan uudis- ja korjausrakentamisen elinkaaren aikaiset CO₂-päästöt toimistorakennuksessa

Diplomityö

Tampereen yliopisto

Ympäristö- ja energiatekniikan tutkinto-ohjelma

Lokakuu 2021

Vanhan rakennuskannan korjaamisella purkamisen ja uudisrakentamisen sijaan on tunnistettu mahdollista päästövähennyspotentiaalia, kun materiaalipäästöjen suuren osuuden synnyttävät runko- ja kantavat rakenteet säilyvät. Uudis- ja korjausrakentamisen koko elinkaaren aikaisten hiilidioksidipäästöjen tarkastelu sekä merkittävimpien päästölähteiden ja niiden erojen tunnistaminen toimii keskeisenä päätöksenteon työkaluna, kun hankkeen varhaisessa vaiheessa arvioidaan toteutettavan ratkaisun vaikutuksia.

Tutkimus taustoitettiin tarkastelemalla kirjallisuuskatsauksessa rakennuksen elinkaaren käsitettä, elinkaaren arviointimenetelmää sekä aikaisempia tutkimuksia uudis- ja korjausrakentamisen elinkaarien arvioinnista. Lisäksi kirjallisuuskatsauksessa tarkasteltiin uudis- ja korjausrakentamisen elinkaaria ja menetelmiä elinkaaren aikaisten vaikutusten, erityisesti päästöjen, vähentämiseen. Uudis- ja korjausrakentamisen elinkaaria ja niiden vaikutuksia tarkasteltiin materiaalien ja niiden käyttöä näkökulmasta, elinkaaren aikana saavutetun energiatehokkuuden ja energi-ankulutusnäkökulmasta sekä toimistorakennuksissa keskeisen parametrin, eli muuntojoustavuuden ja tilatehokkuuden näkökulmasta.

Uudis- ja korjausrakentamisen päästöt simuloitiin työn empiirisessä osuudessa muodostamalla yhteensä kahdeksan uudis- ja korjausrakentamisen toteutusskenaariota ja laskemalla näille One Click LCA-laskentaohjelmalla koko elinkaaren aikaiset päästöt huomioiden myös tontilla sijaitsevan vanhan rakennuksen purun kokonaan tai osittain. Laskennan keskeisimpänä tavoitteena oli tarkastella, millainen päästövaikutus kohteen korjaamisella on purkavan uudisrakentamisen sijaan.

Laskennan tuloksista havaittiin, että tarkastellessa koko elinkaaren aikaisia hiilidioksidipäästöjä, oli kaikissa tapauksissa korjausrakentaminen uudisrakentamista vähäpäästöisempää. Tarkastellessa päästöjä elinkaaren eri vaiheittain, havaittiin että korjausrakentamisessa tuotevaiheen päästöt olivat noin viides osan (2,4–2,5 kgCO₂e/m²/a) koko elinkaaren aikaisesta päästöstä aiheuttaen merkittävästi pienemmän hiilipiikin verrattuna uudisrakentamiseen, jossa tuotevaiheen päästöt olivat noin puolet tai yli 7,2–7,3 kgCO₂e/m²/a) koko elinkaaren aikaisista päästöistä. Korjausrakentamisessa merkittävä osuus elinkaaren aikaisista päästöistä muodostui käytön aikaisen energian aiheuttamista päästöistä, kun uudisrakentamisessa osuus oli pienempi energiatehokkaamman tason seurauksena.

Suoritetuissa tutkimuksissa on havaittu, että korjausrakentaminen ei ole kaikissa tilanteissa uudisrakentamista vähäpäästöisempää. Korjausrakentamisen elinkaari- ja tuotevaiheiden suuruuteen vaikuttaa merkittävästi korjausten laajuus, korjausten yhteydessä saavutettu tilankäytön tehokkuus sekä saavutettu energiatehokkuuden taso. Vanhan rakennuskannan korjaus uuden rakentamisen sijaan voi olla ilmastonmuutoksen hillinnän näkökulmasta suositeltavaa, jos edellä mainituissa parametreissa saavutetaan uudisrakentamisen taso tai sitä parempi taso. Tarkasteltaessa toteutettavia ratkaisuja hankkeen alkuvaiheessa, tulisi eri toteutuksia tarkastella vertailevasti sekä tarkastella ratkaisujen todellista toteutettavuutta. Yleisesti elinkaariajattelu tulisi integroida osaksi päätöksen tekoa läpi hankkeen. Korjausten ja purun yhteydessä toteutuva kiertotalous, elinkaari- ja tuotevaiheiden eritelmät eri toteutuksissa sekä käytön vaikutuksesta päästöihin, kustannuksiin ja energi-ankulutukseen synnyttivät tutkimuksen toteutuksen aikana lisätutkimusaihiota.

Avainsanat: elinkaaren päästöt, uudisrakentamisen hiilijalanjälki, korjausrakentamisen hiilijalanjälki, kestävä rakentaminen

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

ABSTRACT

Tiia-Lotta Tuominen: Whole life carbon emissions of renovation and construction of an office building

Master's thesis

Tampere University

Environmental and Energy Engineering

October 2021

There has been recognised great reduction in emissions if a building is renovated instead of demolition and constructing a new building. Construction of a new building has significant embodied emissions since massive frame and supporting structures can be utilized in the renovation of the building. Furthermore, analyzing and comparison of the whole life cycle impacts of different designs and proposed solutions is an important and crucial tool of decision making.

The theory part of the study included defining the terms concerning building life cycle and life cycle assessment. The building life cycle and its impacts of new construction and renovation was approached by examining the impact of building materials and their durability, the impact of energy efficiency and energy consumption and the impact of the usage of the building and its flexibility to adapt for different use.

The life cycle assessment of the reference office building was conducted with the calculation tool One Click LCA. The calculation included eight different scenarios, four where the existing building was demolished and a new building was constructed and four where the existing building was renovated. In addition of "normal" construction and renovation, the life cycle assessment included scenarios where the ground heat pump system or solar panels were installed.

Compared to new construction, the renovation had smaller whole life carbon emissions in all examined scenarios. The scenarios that included renovation, the embodied carbon emission were about one fifth (2,4–2,5 kgCO₂e/m²/a) of the embodied carbon emission of new construction. The embodied carbon emissions in new construction covered over a half of the whole life carbon emissions.

Then, operational emissions were considerably larger in renovation than in new construction. If the operational emissions are high enough in renovation, the advance in smaller embodied emissions is not enough resulting that new construction can achieve smaller whole life carbon emissions. The life cycle emissions of a renovation is significantly depended on the achieved level of energy efficiency and usage. The feasible level of circular economy in the demolitions, the effect of usage and the life cycle costs in the construction and renovations are themes that need more research in order to give more comprehensive answers when the renovation and new construction are compared.

Keywords: whole life cycle emissions, carbon footprint of construction, carbon footprint of renovation, sustainable construction

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

ALKUSANAT

Hakiessani opiskelemaan silloiseen Tampereen Teknilliseen Yliopistoon tiesin haluavani kehittää alaa kuin alaa vastuullisempaan suuntaan mahdollistaen myös tulevaisuudessa terveelliset ja turvalliset olosuhteet elämälle. Rakennusalalle suuntautuminen oli sattumaa, mutta vuosien varrella olen vakuuttunut rakennusalan vaikutuksista niin ympäristöön kuin sen sosiaalisista ja taloudellisista vaikutuksista. Erityisesti ilmaston lämpenemisen ja sen tuomien haasteiden ja uhkien näkökulmasta, rakennusala toimii keskeisenä tekijänä ilmastonmuutoksen hillinnässä. Alalla on otettu valtavia harppauksia ja muutos on ollut vauhdikasta, mutta työtä ja sen mahdollistavaa tietoa tarvitaan vielä muutoksen aallonharjalla pysymiseen.

Haluan kiittää YIT Oyj:tä tarjoamastaan mahdollisuudesta suorittaa tutkimus useiden asiantuntijoiden sekä tarjottujen työkalujen avustuksella sekä tiimien tukemana. Erityiskiitokset haluan osoittaa ohjaajilleni Elina Virolaiselle sekä Mikko Lempiselle, jotka antoivat tukensa, kannustuksena ja kommentit läpi kirjoitusprosessin. Lisäksi haluan kiittää yliopiston puolelta rakennetun ympäristön tiedekunnan professori Arto Saarta, joka asiantuntevilla kommentteillaan ja hyvillä neuvoillaan ja lähdevinkeillään mahdollisti laadukkaan työn.

Lisäksi haluan erityisesti kiittää perhettä ja ystäviä, jotka ovat tukeneet ja kannustaneet koko opiskeluaikani ja mahdollistaneet omalla panoksellaan valmistumiseni. Opiskeluaikoihini on mahtunut niin ylä- kuin alamäki, mutta onnekseni matkassa on aina ollut mukana tsemppaavia ystäviä ja loputtoman tukensa antanut perhe, jotka ovat nostaneet ylös ja naurattaneet synkkinä hetkinä sekä toisaalta jakaneet unohtumattomat ilon hetket kanssani.

Helsingissä, 15.10.2021

Tiia-Lotta Tuominen

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
1.1 Tutkimuksen tausta ja tutkimusongelmat.....	1
1.2 Tutkimuksen tavoitteet ja rajaus.....	3
1.3 Tutkimusmenetelmät ja työn rakenne.....	4
2. RAKENNUKSEN ELINKAARIARVIOINTI.....	6
2.1 Rakennuksen elinkaari.....	6
2.2 Elinkaaren ympäristövaikutuksia ohjaava lainsäädäntö ja standardointi	8
2.3 Rakennuksen elinkaaren arviointimenetelmät	9
2.4 Aikaisemmat tutkimukset uudis- ja korjausrakentamisen elinkaaren aikaisista hiilidioksidipäästöistä.....	11
3. UUDIS- JA KORJAUSRAKENTAMISEN ELINKAARIIN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT	16
3.1 Uudis- ja korjausrakentamisen keinot vähähiilisyteen.....	16
3.2 Rakennusmateriaalit ja -tuotteet ja niiden tekninen käyttöikä	21
3.3 Elinkaaren aikainen energiatehokkuus ja energiankulutus	23
3.4 Tilojen muuntojoustavuus ja monikäyttöisyys.....	30
4. UUDIS- JA KORJAUSRAKENTAMISEN ELINKAARIPÄÄSTÖJEN MALLINTAMINEN.....	34
4.1 Elinkaaripäästöjen mallintaminen One Click LCA-ohjelmalla.....	34
4.2 Olemassa olevan rakennuksen sekä laskennassa mallinnettavien skenaarioiden kuvaus.....	36
4.3 Laskennan suorittaminen	42
4.4 Laskennassa tehdyt rajaukset ja oletukset	45
5. LASKENNAN TULOSTEN ANALYSOINTI	52
5.1 Laskennan tulokset.....	52
5.2 Laskennan tulosten analysointi	59
5.3 Tulosten luotettavuuden ja merkittävyyden arviointi	64
6. JOHTOPÄÄTÖKSET JA JATKOTUTKIMUS.....	68
6.1 Johtopäätökset.....	68
6.2 Jatkotutkimusehdotukset.....	71
LÄHTEET.....	73
LIITE A: LASKENNASSA TARKASTELTUJEN SKENAARIOIDEN HIILIDIOKSIDIPÄÄSTÖT LÄMMITETTYÄ NETTOALAA KOHDEN VUODESSA ELINKAAREN ERI VAIHEISSA	79

KUVALUETTELO

Kuva 1.	<i>Rakennuksen elinkaaren vaiheet moduuleittain (Ympäristöministeriö 2019a s.14; SFS-EN 15643-2 2011 ss. 20–22)</i>	<i>7</i>
Kuva 2.	<i>Rakennuksen elinkaaren vaikutusten arvioinnin esimerkki syötteet ja tuotokset (Crawford 2011 s. 39; Ympäristöministeriö 2019a s. 14)</i>	<i>9</i>
Kuva 3.	<i>Periaatekuva rakennuksen elinkaaren aikaisesta hiilijalanjäljestä ajan funktiona (Huuhka et al. 2021 s. 22)</i>	<i>13</i>
Kuva 4.	<i>Periaatekuva korjausrakentamisessa saavutetun energiatehokkuuden tason vaikutuksesta elinkaaren aikaiseen hiilijalanjälkeen verrattuna uudisrakentamisen energiatehokkuuden tasoon (Huuhka et al. 2021 ss. 26–28).....</i>	<i>15</i>
Kuva 5.	<i>Periaatekuva hankkeen kehitys-, suunnittelu ja rakentamisvaiheen päätöksien vaikutuksista saavutettuun päästövähennyspotentiaaliin (World Green Building Council 2019 ss. 20–21; HM Treasury 2013 s. 11)</i>	<i>18</i>
Kuva 6.	<i>Korjausrakentamisen pitkän aikavälin strategian mukaiset toimenpiteet vuoteen 2020 mennessä valmistuneen rakennuskannan muuttamiseksi erittäin energiatehokkaaksi ja vähähiiliseksi (Ympäristöministeriö 2020 ss. 26–33)</i>	<i>20</i>
Kuva 7.	<i>Energiantuotannon vähähiilisysolettaman vaikutuksesta (vertaa kuva 4) purkavan uudis- sekä korjausrakentamisen elinkaaren hiilijalanjäljen kertymiseen ajan funktiona (Huuhka et al. 2021 s. 32)</i>	<i>24</i>
Kuva 8.	<i>Rakennushankkeen elinkaaren hiilijalanjäljen arvioinnin prosessi One Click LCA -ohjelmassa (One Click LCA Ltd 2021)</i>	<i>36</i>
Kuva 9.	<i>Laskennassa simuloitavan rakennuksen julkisivu pääsisäänkäynnillä.....</i>	<i>37</i>
Kuva 10.	<i>Eri skenaarioiden osuudet (%) laskennassa suurimmasta elinkaaren hiilijalanjäljestä sekä laskennan tuloksena saadut skenaarioiden hiilijalanjäljet (kgCO₂e/m²/a) sisältäen ennen elinkaarta tapahtuvan purun.....</i>	<i>52</i>
Kuva 11.	<i>Simuloidun toimistorakennuksen purkavan uudisrakentamisen ja korjausrakentamisen hiilijalanjäljet ajan funktiona</i>	<i>54</i>
Kuva 12.	<i>Simuloitujen skenaarioiden hiilijalanjälki ajan funktiona</i>	<i>55</i>
Kuva 13.	<i>Laskennassa simuloitujen skenaarioiden koko elinkaaren aikaisten päästöjen jakautuminen elinkaaren eri vaiheille</i>	<i>56</i>
Kuva 14.	<i>Purkavan uudisrakentamisen tuotevaiheen A1-A3 hiilidioksidipäästöjen jakautuminen eri rakennusosille</i>	<i>57</i>
Kuva 15.	<i>Korjausrakentamisen tuotevaiheen A1-A3 hiilidioksidipäästöjen jakautuminen eri rakennusosille</i>	<i>58</i>

1. JOHDANTO

1.1 Tutkimuksen tausta ja tutkimusongelmat

Rakentaminen ja rakennukset ovat keskeinen osa yhteiskuntaa ja ympäristöä. Rakennetun ympäristön osuuden ollessa kasvihuonepäästöistä lähes 40 %, energiankulutuksesta noin 40 %, työllisyydestä noin 20 % sekä kansallisvarallisuudesta yli 75 %, on rakennettua ympäristöä koskevilla valinnoilla vaikutus sekä yhteiskunnan että ympäristön hyvinvointiin ja kestävyteen (Rakennusteollisuus RT 2021a). Kestävän kehityksen ja sen periaatteiden yhdistäminen rakennettuun ympäristöön ja rakentamiseen on nousut keskiöön, kun rakennetun ympäristön taloudellisia, sosiaalisia sekä ekologisia vaikutuksia on alettu ottaa yhä enemmän huomioon. Erityisesti rakennusalan päästöjen sekä energiankulutuksen korkeat osuudet ovat herättäneet huomion ja lisänneet tarvetta vähentäville toimenpiteille. Toisaalta rakennusallalla on tunnistettu suurta potentiaalia päästöjen alentamisessa sekä minimoimisessa, joka on nostanut alalla esiin kestävän rakentamisen käsitteen ja menetelmät kestävän rakentamisen toteuttamiseksi. (Berardi 2013 s. 72)

Rakentamisen lainsäädäntö on uudistumassa ja siihen ollaan sisällyttämässä vähähiilisyiden arvioiminen läpi rakennuksen elinkaaren: rakentamisesta korjaamiseen ja lopulta purkamiseen. Lainsäädännön uudistumisen taustalla toimivat kansainväliset tavoitteet vähentää rakentamisen ja rakennusalan kasvihuonepäästöjä. Suomessa kasvihuonekaasujen päästövähennystavoite on ilmastolaissa (609/2015 6 §) määritetty 80 prosenttiin vuoteen 2050 mennessä. (Ympäristöministeriö 2019a s. 11) Ilmastolaki velvoittaa myös rakennusalaan ja ilmastolain asettamien tavoitteiden lisäksi useimmat yksittäiset toimijat ovat ottaneet tiukempia tavoitteita päästövähennyksien sekä ilmastomuutoksen hillinnän toteuttamiseksi. YIT Oyj on asettanut omalle toiminnalleen osana liiketoimintastrategiaa kolme keskeistä kestävän kehityksen pitkän aikavälin tavoitetta: puolittaa CO₂ päästöt vuoteen 2030 mennessä, mahdollistaa omaperusteisissä hankkeissa hiilineutraali lämmitys, jäähdytys ja lämmin vesi sekä laskea omaperustaisten hankkeiden kohdekohtainen hiilijalanjälki (YIT Oyj 2021).

Hiilidioksidia (CO₂) pidetään merkittävimpana kasvihuonekaasuna, joka edistää ilmastomuutosta aiheuttaen globaaleja ongelmia, kuten esimerkiksi ilmaston lämpenemistä sekä merenpinnan nousua. Rakennetusta ympäristöstä on tunnistettu kuitenkin keskei-

siä tehokkaita menetelmiä päästöjen vähentämiseen lyhyellä ajanjaksolla. Tarkasteltaessa koko rakennuksen elinkaaren vaiheita, lähes 90 % rakennuksen elinkaaripäästöistä muodostuu käyttövaiheessa pääosin energiankulutuksen seurauksena. Erityisesti pohjoismaissa lämmityksen osuus rakennuksien kasvihuonepäästöistä on noin kaksi kolmasosaa. Käytönaikaisen energiankulutuksen merkittävän päästövaikutuksen myötä, yhdeksi keskeisimmäksi menetelmäksi rakennusalan päästöjen vähentämiseksi on nostettu rakennuskannan uudistuminen vanhan rakennuskannan poistuman seurauksena. Aikaisemmat tutkimukset ovat antaneet kuitenkin näyttöä, että vanhempaan rakennuskantaan toteutettavat energiatehokkuutta parantavilla korjauksilla saavutetaan korkea energiatehokkuuden taso samalla mahdollistaen käytönaikaisen päästövaikutuksen pienentymisen. Näin ollen rakennusvaiheen aikaiset sekä materiaaleihin sitoutuneet päästöt ovat siirtymässä päästövaikutusten tarkastelussa enemmän keskiöön, jonka seurauksena rakentamisen aikaista hiilipiikkiä on alettu pitää entistä merkittävämpänä osana elinkaaripäästöjen tarkastelua ja muodostumista. Hiilipiikin negatiivinen vaikutus ilmastoon on korostunut, kun tutkimuksissa on todettu, että lähiaikoina ja lyhyen ajanjakson aikana aiheutetut päästöt ilmaan ovat haitallisempia, kuin tulevaisuudessa tapahtuvat päästöt. Lisäksi kysymykset ja epävarmuudet koskien purkujätteen määrän hallintaan sekä kiertotalousratkaisujen mahdollisuuksiin purkamisen yhteydessä on herättänyt keskustelua purkamisen negatiivisista vaikutuksista ilmastoon. (Säynäjoki et al. 2012 ss. 1–2; Huuhka et al. 2021 s. 11)

Suurimman osan rakennusaikaisten materiaalipäästöjen muodostuessa runkorakenteiden myötä sekä yleisesti käyttöä edeltävien rakennuksen elinkaaren vaiheiden aikana (Ruuska & Häkkinen 2013 s. 322), olisi yksinkertainen implikaatio se, että korjausrakentaminen on elinkaaripäästöiltään pienempää, kun runkorakenteita ei tarvitse rakentaa kohteen peruskorjauksen yhteydessä. Kuitenkaan elinkaaren aikaisten päästöjen eroa korjaus- ja uudisrakentamisen välillä tai mahdollisuuksia päästövaikuttamisesta eri hankkeissa ei ole kyetty täysin todentamaan. Erityisesti toimitilarakentamisen elinkaaren aikaisista CO₂-päästöistä sekä korjausrakentamisen päästölaskennasta ja sen vertailtavuudesta uudiskohteiden päästötietoihin on vähän tietoa ja tutkimusta saatavilla. Kasvihuonepäästövähennystavoitteiden saavuttaminen vaatii elinkaariajattelun sekä kestävien ja tehokkaiden ratkaisujen integroimista osaksi eri kiinteistökonsepteja (Häkkinen & Ala-Kotila 2019 s. 51). Nopeasti kasvanut tietoisuus rakentamisen ympäristövaikutuksista sekä rakennus- ja kiinteistöalan sidosryhmien kasvanut mielenkiinto rakentamisen ja rakennetun ympäristön vaikutuksista on kasvattanut kuilua kysynnän ja tarjonnan välillä.

1.2 Tutkimuksen tavoitteet ja rajaus

Tutkimuksia rakentamisen sekä rakennuksien ja niiden sisältämien materiaalien ympäristövaikutuksia sekä erityisesti hiilidioksidipäästöjä on laskettu sekä arvioitu viime vuonna paljon, erityisesti asuntorakentamisen puolella, ympäristötietoisuuden sekä toimialoille asetettujen velvoitteiden vuoksi. Lisäksi kohteiden vuokralaisten sekä sijoittajien keskuudessa on herännyt tietoisuus ja mielenkiinto rakentamisen sekä tilojen käytön ympäristövaikutuksista. Tutkimuksen tavoitteena on tarkastella sekä uudisrakentamisen että korjausrakentamisen elinkaaripäästöjä laskennallisesti. Saatujen tulosten perusteella voidaan muodostaa parempaa kuvaa erityisesti korjausrakentamisen ympäristövaikutuksista sekä tarkastella kohteen peruskorjauksen päästövaikutusta verrattuna saman kohteen purkavan uudisrakentamisen päästövaikutuksiin. Lisäksi työn tavoitteena on edistää YIT:n (2021) asettamia kestävän kehityksen tavoitteita lisäämällä sisäisesti tietoisuutta erityisesti toimitilojen uudis- ja korjausrakentamisen elinkaaripäästöjen laskennasta sekä elinkaaripäästöihin vaikuttavista tekijöistä.

Työn toimeksiantajan näkökulmasta työn tavoitteena on saada laskennallista dataa uudis- ja korjausrakentamisen elinkaaripäästöistä sekä niiden eroista toisiinsa nähden. Työssä tarkastellaan rakennuksen elinkaarta sekä rakennuksen eri parametrien vaikutusta elinkaaren aikaisten päästöjen muodostumiseen. Elinkaaripäästöjen arvioinnin sekä tunnistettujen elinkaaren aikaisten päästöjen muodostumiseen ja elinkaaren kestävyteen vaikuttavien tekijöiden avulla voidaan edistää kestävän elinkaariajattelua ja sen todentamista hankkeen eri sidosryhmille ja osapuolille.

Työn keskeiseksi tutkimuskysymykseksi on työn tavoitteiden pohjalta määritelty:

Millainen elinkaaren aikainen päästövaikutus, sillä on, jos vanha toimistorakennus korjataan uuden rakentamisen sijaan?

Pääkysymyksen tueksi on muodostettu täydentäviä tutkimuskysymyksiä, joiden avulla pyritään tunnistamaan mahdolliset tekijät, jotka vaikuttavat elinkaareen ja sen kestävyteen sekä elinkaaren päästöihin ja niiden muodostumiseen. Lisäksi tunnistettuja tekijöitä tarkastellaan vertailevasti uudis- korjausrakentamisen välillä. Täydentävät tutkimuskysymykset on laadittu seuraaviksi:

Mitkä tekijät vaikuttavat elinkaaren aikaiseen hiilijalanjälkeen uudis- ja korjausrakentamisessa?

Kuinka elinkaaren eri vaiheiden päästövaikutukset eroavat uudis- ja korjausrakentamisessa?

Työn kirjallisuuskatsauksessa tarkasteltavia rakennuksen elinkaareen vaikuttavia tekijöitä tullaan tarkastelemaan tasolla, joka on merkityksellistä kohteiden hankekehityksen vaiheessa. Työssä ei tulla suorittamaan tarkasteltavien kehitysvaihtoehtojen rakennusteknistä suunnittelua, vaan kirjallisuuskatsauksen tavoitteena on tunnistaa keskeiset rakennuksen elinkaareen vaikuttavat tekijät (käyttökä ja elinkaari, energiankulutus ja -tehokkuus, tilojen muuntojoustavuus, tilatehokkuus ja käyttöaste). Näitä parametreja tarkastellaan uudis- ja korjausrakentamisen näkökulmista ja arvioida niiden vaikutusta elinkaaren aikaisiin päästöihin.

1.3 Tutkimusmenetelmät ja työn rakenne

Tässä diplomityössä tullaan hyödyntämään tutkimusmenetelminä sekä laadullisia että määrällisiä menetelmiä. Työn teoriaosuus suoritetaan laadullisena tutkimuksena, jolloin tutkimusaineistoina käytetään aiheeseen liittyviä aikaisempia tutkimuksia, lainsäädäntöä sekä ohjeistuksia. Tutkimuksessa tarkastellaan kirjallisuuskatsauksessa elinkaaren eri vaiheiden hiilijalanjälkeä sekä elinkaaren aikaisia hiilidioksidipäästöjä korjausrakentamiselle sekä purkavalle uudisrakentamiselle. Vertailun kvantitatiivinen tutkimus suoritetaan laskennallisesti One Click LCA-ohjelman avulla. Elinkaariarvioinnin suorittaminen hankkeiden kehitys- ja suunnitteluvaiheissa mahdollistaa elinkaaren eri vaiheiden vaikutusten arvioinnin hankkeen varhaisessa vaiheessa, jonka pohjalta voidaan ohjata hankkeen suunnittelua kustannustehokkaasti. Elinkaariarviointi mahdollistaa ratkaisujen vertailun ja tämän myötä se toimii päätöksenteon tukena, jolloin kestävä rakentamisen mukaisia ratkaisuja voidaan edistää ja kehittää osana hankkeen suunnitteluprosessia. (Ympäristöministeriö 2019b)

Rakennushankkeen elinkaaren aikaisia vaikutuksia ilmastoon voidaan tarkastella elinkaariarvioinnin (LCA=Life Cycle Assessment) avulla, joka huomioi tarkasteltavan toiminnan tai objektien vaikutusta ympäristöön suorasti sekä epäsuorasti (Säynäjoki et al. 2011 s. 116). Tässä tutkimuksessa elinkaariarviointi tullaan suorittamaan niin kutsutulla LCA-hybridimallilla, joka yhdistää kustannuspohjaisen sekä rajallisen prosessipohjaisen arviointimenetelmien hyödyt muodostaen laajan ja virhelähteet minimoivan menetelmän. (Säynäjoki et al. 2011 s. 117; Leino 2020 ss. 17–18). Elinkaariarvioinnin avulla mahdollistetaan koko rakennuksen elinkaaren aikaisten ympäristövaikutusten arviointi, joka on keskeinen huomioitava kokonaisuus työn kirjoitushetkellä uudistuvassa Suomen maankäyttö- ja rakennuslaissa (mrluudistus.fi 2021).

Työn toisessa luvussa tarkastellaan teoriaa liittyen rakennuksen elinkaareen ja elinkaaren vaiheisiin sekä elinkaarivaikutusten arviointimenetelmään. Toisessa luvussa tarkas-

tellaan myös elinkaaren ympäristövaikutuksia ohjaavaa lainsäädäntöä sekä standardointia. Luvussa tarkastellaan myös aikaisempien tutkimusten tuloksia uudis- ja korjausrakentamisen elinkaaripäästöjen arvioinnista.

Tutkimuksen kolmannessa luvussa tarkastellaan rakennuksen elinkaareen, sen kestävyteen ja hiilidioksidipäästöihin vaikuttavia tekijöitä. Luvussa tarkastellaan rakennusosien käyttöikä, energiatehokkuutta sekä menetelmiä energiatehokkuuden parantamiseen korjaushankkeessa sekä muuntojoustavuuden vaikutusta elinkaaren kestävyteen, korjattavuuteen ja energiatehokkuuteen.

Itse elinkaaren aikaisten hiilidioksidipäästöjen laskennan suorittamien esitellään luvussa neljä. Luvussa esitellään tarkasteltava kohde ja tarkasteltavat skenaariot, tehdyt rajaukset sekä kuvataan laskennan suorittaminen. Laskennan tulokset esitellään tutkimuksen luvussa viisi, jossa tulokset esittelyn lisäksi analysoidaan sekä arvioidaan niiden luotettavuus. Luvussa tehdään varsinainen vertailu eri kohteiden välillä sekä tunnistetaan mahdolliset suurimmat erot ja yhtäläisyydet.

Kuudennessa luvussa työn tuloksien ja teorian pohjalta luodaan johtopäätökset, tarkastellaan tuloksia sekä pohditaan mahdollisten tehtyjen rajausten vaikutusta tuloksiin. Lisäksi johtopäätösten yhteydessä tunnistetaan mahdollisia jatkotutkimusaihoita.

2. RAKENNUKSEN ELINKAARIARVIOINTI

Kestävä rakentaminen tavoitteena on toteuttaa rakentaminen ja sen ohjaus kestävän kehityksen periaattein mahdollisimman pienin negatiivisin ympäristövaikutuksin huomioiden samalla rakentamisen sosiaaliset ja taloudelliset vaikutukset kohteen elinkaaren aikana. Elinkaariarvioinnilla (LCA) arvioidaan tarkasteltavan kohteen, esimerkiksi rakennuksen tai tuotteen, ekologista kestävyyttä ja vaikutuksia ympäristöön sen koko elinkaaren aikana. Elinkaariarvioinnissa voidaan tarkastella useita eri luonnonvarojen kulutusta ja päästöjä kuvaavia parametreja eri indikaattoreiden avulla. Tässä työssä elinkaariarvioinnissa tarkastellaan rakennuksen hiilijalanjälkeä, eli ilmaston lämpenemispotentiaalia (GWP). Kasvihuonekaasujen (erityisesti CO₂) lisääntyminen ilmakehässä edesauttaa maata lähimpien kerrosten lämpenemistä nostaen samalla maapallon keskilämpötilaa aiheuttaen esimerkiksi jäätiköiden sulamista ja merenpinnan nousua. (Ympäristöministeriö 2019b) Suorittamalla elinkaariarviointi rakennushankkeelle koko elinkaaren eri vaiheiden, rakennusmateriaalien raaka-aineiden hankinnasta rakennuksen käytön kautta rakennuksen purkuun ja jätteiden käsittelyyn, saadaan dataa eri sidosryhmien käyttöön rakennushankkeen ympäristövaikutuksista.

2.1 Rakennuksen elinkaari

Rakennuksen elinkaaren jaetaan neljään eri vaiheeseen: tuotevaihe (A1-3), rakentaminen (A4-A5), käyttövaihe (B1-B7) ja elinkaaren loppu (C1-C4). Elinkaaren ympäristövaikutusten arviointimenetelmää ja elinkaaren tarkempaa tarkastelua varten vaiheet on jaettu pienempiin moduuleihin, joita tarkastelemalla saadaan yksityiskohtaisempaa tietoa elinkaaren eri vaiheiden ympäristövaikutuksista. Elinkaariarvioinnissa voidaan huomioida myös rakennuksen elinkaaren ulkopuolelle jäävät esimerkiksi kierrätyksestä ja uudelleenkäytöstä aiheutuvat haitat tai hyödyt (D). (Ympäristöministeriö 2019a s.14; SFS-EN15643-2 2011 ss. 20–22) Rakennuksen elinkaaren vaiheet esitetty kuvassa 1.



Kuva 1. Rakennuksen elinkaaren vaiheet moduuleittain (Ympäristöministeriö 2019a s.14; SFS-EN 15643-2 2011 ss. 20–22)

Rakennuksen ja rakentamisen elinkaariarvioinnin tavoitteena on ympäristövaikutusten arvioinnin ja määrittämisen lisäksi tarjota asiakkaille, käyttäjille ja suunnittelijoille työkaluja ja vaihtoehtoja hankkeen kestävyuden määrittämiselle sekä toteuttamiselle. Rakennuksen elinkaariarviointi suoritetaan rakennukselle huomioiden rakennuksen ulkoiset osat, tekniset järjestelmät ja kalusteet sekä työmaa-alueen ja rakentamiseen ja työmaahan liittyvät väliaikaiset työt ja työvaiheet läpi rakennushankkeen elinkaaren. Rakennuksen elinkaaren katsotaan alkavan raaka-aineiden hankinnasta (moduuli A1), jotka jatkojalostetaan kuljetuksen (A2) kautta rakennustuotteiden valmistukseen (A3). Rakentamisen vaikutuksia tarkastellaan rakennustuotteiden kuljetuksessa työmaalle (A4) sekä työmaatoiminnoissa (A5). Käyttövaiheessa arviointi muodostetaan käyttövaiheen aikaisten yllä- ja kunnossapidon (B2), mahdollisten pienempien (B3) ja laajamittaisten korjausten (B5) sekä osien vaihdon (B4), energian (B6) ja veden (B7) käytön sekä tuotteiden käytön (B1) aiheuttamien ympäristövaikutusten ja näkökulmien arvioinnin kautta. Elinkaaren loppuvaiheessa hankkeen ympäristövaikutukset muodostetaan purkamisen (C1), purkujätteen kuljetuksen (C2) ja käsittelyn (C3) sekä purkujätteen loppusijoituksen ympäristövaikutusten arvioinnin avulla. Rakennuksen elinkaariarviointiin voidaan sisällyttää myös moduuli D, jossa arvioidaan rakennuksen elinkaaren aikaisesta kierrätyksestä, uudelleenkäytöstä sekä energian ja lämmön talteenotosta aiheutuvat ympäristövaikutukset. (SFS-EN 15643-2 2011 ss. 18–22)

2.2 Elinkaaren ympäristövaikutuksia ohjaava lainsäädäntö ja standardointi

Kansainvälisellä sekä Euroopan tasoisella standardisoinnilla mahdollistetaan yhtenäiset menettelytavat kestävien rakennuksien määritelmille, arvioinnille sekä rakentamisen ja suunnittelun toteuttamiselle ja arvioinnin vertailtavuudelle. Kansainvälisellä tasolla suoraan kestävästä rakentamisesta ohjaa ISO (International Organization of Standardization) ja Euroopan tasolla CEN (European Committee for Standardization), joiden komiteat edistävät tahoillaan kestävästä rakentamisen standardointia (Vares et al. 2011 s. 12). Suomessa kestävästä rakentamisesta ohjaa erityisesti CEN ja sen tekninen komitea TC 350 Sustainability of construction works, joka työssään huomioi kehyksenä myös ISO:n komitean TC 59 SC 17 (Sustainability in building and construction) työtä. Standardisoinnin hyötynä on yhteisten ympäristövaikutusten arviointimenetelmän lisäksi esimerkiksi CEN/TC 350 pohjalta luodut rakennustuotteiden ympäristöselosteet, joita voidaan hyödyntää esimerkiksi laskennallisesti rakennuksen elinkaarenaikaista ympäristövaikutusta. (Vares et al. 2011 ss. 12; Rakennusteollisuus RT 2021b) Ympäristöselosteiden avulla on julkaistu vuonna 2021 rakentamisen päästötietokanta (2021), jonka tavoitteena on tuoda puolueettomasti dataa rakennustuotteiden ilmastovaikutuksista tuoden esiin rakennustuotteista keskimääräistä tietoa niiden hiilijalan- ja kädenjäljestä, kierrätyksen ja uudelleenkäytön vaihtoehtoista käytön jälkeen, työmaalla syntyvän hukan määrästä sekä vaihdettavien tuotteiden teknisestä käyttöiästä. Tietojen esilletuomisella pyritään yhdenmukaistamaan kasvihuonepäästöjen laskentaa sekä sen avulla luodaan pohja rakentamisen säädösohjaukselle. (co2data.fi 2021; ym.fi 2021a)

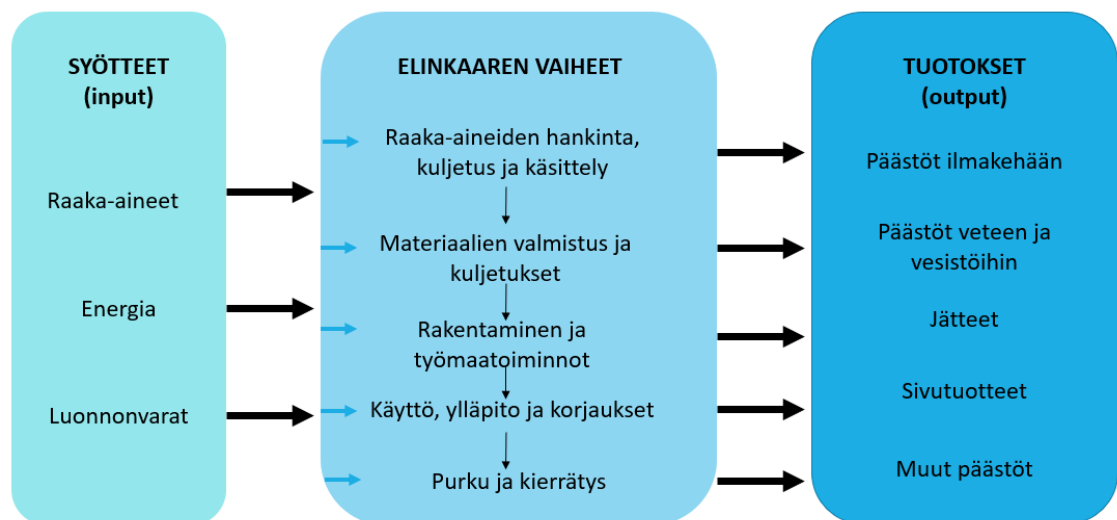
Suomessa keskeisin rakentamista ohjaava lainsäädäntö on Maankäyttö- ja rakennuslaki (132/1999). Maankäyttö- ja rakennuslain sekä sitä täydentävä asetus Maankäyttö- ja rakennusasetus (895/1999) ohjaavat alueiden käyttöä ja rakentamista säätelemällä maankäytön suunnittelua, kaavoitusta, rakennusjärjestystä, yleisesti maapolitiikkaa, rakennuksien suunnittelua ja rakentamista. Maankäyttö- ja rakennuslain sekä -asetuksen tavoitteena on luoda ja varmistaa turvallinen ja terveellinen elinympäristö alueiden käytön ja rakentamisen avulla. Lain tavoitteena on myös edistää kestävästä kehitystä kaikissa sen pilareissa (kuva 1). (132/1999 1 §)

Maankäyttö- ja rakennuslaki on uudistumassa työn kirjoitushetkellä tavoitteena saada hallituksen esityksen uudesta laista valmiiksi vuoden 2021 loppuun mennessä. Uudistuksen keskiössä ovat esimerkiksi megatrendien, rakentamisen ja alueidenkäytön suunnittelun laadun, alueiden elinvoimaisuuden ja kestävästä kehityksen tuomien vaatimusten ja haasteiden huomioon ottaminen osana lainsäädäntöä ja rakennetun ympäristön oh-

jausta. Keskeisimmiksi uudistuksen tavoitteiksi on nostettu yhteiskunnan hiilineutraaliustavoitteet, digitalisaation aseman vahvistaminen rakentamisessa, rakentamisen laadun varmistaminen ja parantaminen sekä luonnon monimuotoisuuden säilymisen varmistaminen ja vahvistaminen. (Ympäristöministeriö 2021) Uudistuksessa on tarkoitus tarkastella esimerkiksi kaavoituksen ja maankäytön suunnittelun vaikutusta vähähiilisyiden ja kestävyiden tavoitteiden saavuttamiseen sekä yleisesti menetelmiä vähähiilisyiden tavoittamiseksi. Uudistukseen tullaan liittämään vahvasti myös elinkaaren kestävyys sen suunnitelmallisen käytön ja ylläpidon avulla sekä kestävä kehityksen tavoitteiden saavuttamisen vastuuttamista ja roolitusta eri osapuolille. (mrluudistus.fi 2021)

2.3 Rakennuksen elinkaaren arviointimenetelmät

Rakennuksen elinkaariarviointia suoritettaessa arvioinnin lähtötietoina toimii rakennuksen tiedot, kuten rakennuksessa käytettävät materiaalit ja niiden määrät, rakennuksen ja sen tuotteiden käyttöiät, pinta-alat ja tilavuudet sekä käyttövaiheen energian tarve. Elinkaariarvioinnin tuloksia ja tuotoksia voidaan hyödyntää materiaalivalintojen, suunnitteluratkaisujen ja talotyyppien vertailussa suunnittelu- ja kehitysvaiheessa. (Ympäristöministeriö 2019b s.7; Säynäjoki et al. 2011 s. 116)



Kuva 2. Rakennuksen elinkaaren vaikutusten arvioinnin esimerkki syötteen ja tuotokset (Crawford 2011 s. 39; Ympäristöministeriö 2019a s. 14)

Ympäristövaikutusten ja rakentamisen kestävyiden arvioinniksi on kehitetty ISO- ja EN-standardien pohjalta standardoituja arviointimenetelmiä niin kansainvälisellä kuin kansallisella tasolla. Euroopan komissio on kehittänyt vapaaehtoisesti käytettävän Level(s)-menetelmän rakennusten kestävyiden yhtenäiseksi raportointi- ja arviointikehykseksi.

Level(s)-menetelmän tavoitteena on standardoida rakentamisen resurssitehokkuuden ja ekologisuuden mittaaminen yhtenäisen kommunikoinnin ja tulosten vertailtavuuden varmistamiseksi. Level(s) sisältää kuusi päätavoitetta, joista jokainen pitää sisällään erillisiä alakohtia. Level(s)-menetelmän tavoitteet ovat järjestyksessä elinkaaren hiilijalanjälki, resurssitehokas materiaalien käyttö, veden kulutus, terveelliset tilat ja sisäilman laatu, sopeutuminen ilmastomuutokseen sekä elinkaarikustannukset. Tavoitteista useat edellyttävät EN-standardien käyttöä. Tässä tutkimuksessa tullaan keskittymään Level(s)-menetelmän ensimmäiseen tavoitteeseen (elinkaaren hiilijalanjälki), joka on jaettu Level(s)-menetelmässä käytön aikaisen energiankulutuksen sekä elinkaaren aikaisen ilmastolämpenemispotentiaalin (GWP) alakohtiin. Päätavoitteena on minimoida elinkaaren aikaiset kasvihuonekaasupäästöt sekä löytää kompromissi energiatehokkuutta parantavien toimenpiteiden ja materiaaleihin sitoutuneiden päästöjen suhteessa mahdollisimman alhaisten elinkaaripäästöjen saavuttamiseksi. (ym.fi 2021b; Dodd et al. 2021)

Level(s)-menetelmää on testattu ennen käyttöönottoa EU:n jäsenmaissa ja se oli Suomessa testauksessa vuosina 2019. Ympäristöministeriö käyttää sekä EN-standardisointia että Level(s)-menetelmää pohjana Suomessa käyttöön otettavalle standardisoidulle vähähiilisen rakentamisen arviointi- ja raportointimenetelmälle. (ym.fi 2021b). Menetelmän julkistus on osa vähähiilisen rakentamisen tiekarttaa (Bionova Oy 2017), jonka avulla edistetään rakentamis- ja kiinteistöalan ilmastotavoitteita sekä erityisesti pyritään vähentämään rakentamisen ja sen materiaalien hiilijalanjälkeä sääntelyn kautta sekä toimeenpannaan muuttuvan Maankäyttö- ja rakennuslain asettamat velvoitteet. (Bionova Oy 2017). Työn kirjoitushetkellä testivaiheessa olevaa arviointimenetelmää voidaan hyödyntää sekä uudiskohteiden että laajamittaisten korjauskohteiden hiilijalan- ja -kädenjäljen arviointiin. Arviointi suoritetaan käytännössä rakennuksen ja hankkeen koko elinkaaren vaiheille laskentatyökalulla hyödyntäen arviointimenetelmää sekä tuotteiden ja -prosessien päästötietoja. (Ympäristöministeriö 2019 ss. 11–12)

Ympäristöministeriö (2019a s. 12) suosittaa rakennushankkeen elinkaariarvioinnin suorittamista rakennesuunnittelun aikana, jolloin hankkeelle on määritelty riittävästi parametreja materiaaleihin ja energiantarpeeseen liittyen, jotta arvioinnista saadaan mahdollisimman kattava ja merkityksellinen. Ennen rakennesuunnittelua suoritettujen arviointimenetelmän tuloksia voidaan kuitenkin soveltaa tavoitteiden asettamisessa. (Ympäristöministeriö 2019a) Euroopan komission Level(s)-menetelmässä arvioinnin ajankohta ja sen tarkkuus riippuu valitusta tarkastelutasosta. Level(s):iä voidaan suorittaa kolmella tasolla, joista ensimmäinen on yksinkertaistettu arviointi hankkeen hyvin varhaisessa vaiheessa, jolloin hanketta tarkastellaan kvalitatiivisesti ja tavoitteena on löytää tavoiteltu taso ja arvioida konseptitason ratkaisujen vaikutusta. Tasolla kaksi tarkastellaan eri

suunnitteluratkaisuja kvantitatiivisesti ja tarkoituksena on tarkastella toiminnallisesti samanlaisten ratkaisujen ja toteutusten kestävyyttä ja vaikutusta. Taso kolme on tarkim tarkastelutasoista, jolloin eri ympäristöindikaattoreiden ja arviointimetodien avulla rakennuksen rakentamisen ja käytön toiminnallisuutta, tehokkuutta ja kestävyyttä. (ym.fi 2021b; Dodd et al. 2021 s. 12) Tässä diplomityössä LCA:ta käytetään tarkastelemaan hankekehityksessä kahden eri vaihtoehdon, kohteen purkavan uudisrakentamisen ja korjausrakentamisen, elinkaaren aikaisten päästöjen vertailuun päätöksenteon tueksi sekä kaavamääräyksiin vastaamiseen.

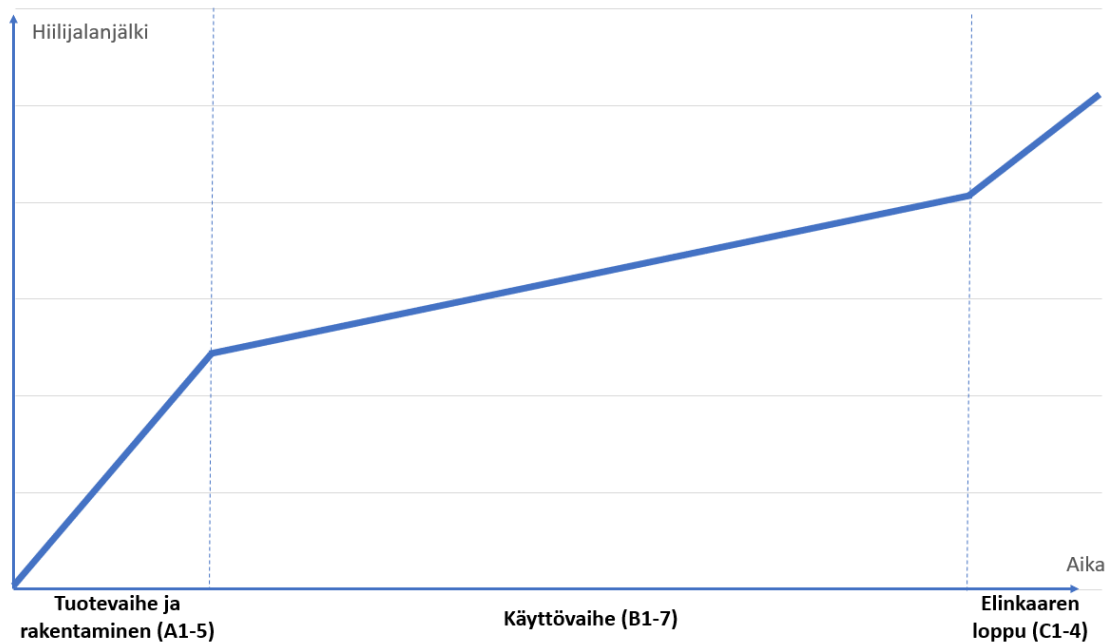
2.4 Aikaisemmat tutkimukset uudis- ja korjausrakentamisen elinkaaren aikaisista hiilidioksidipäästöistä

Säynäjoki et al. (2012) suorittivat vertailevan elinkaaren arviointimenetelmän pientalo-alueelle, jossa vertailtiin ns. tavallista rakennusta, matalaenergiataloa, 60-luvulla rakennettua korjattavaa rakennusta sekä passiivitaloa. Tutkimuksessa havaittiin, että rakentamisen osuus muodostuneista päästöistä oli jopa 60 %. Korjausrakentamisen toimenpiteet ajoitettiin uudisrakentamisen kanssa samalle ajankohdalle. Korjausrakentamisen korjaustoimenpiteille saatiin tavalliseen uudisrakentamiseen verrattuna yli 30 % pienemmät rakentamisvaiheen aikaiset päästöt. Tutkimuksessa korostettiin erityisesti rakentamisen aikaisen hiilipiikin merkitystä koko elinkaaren aikaisesta hiilijalanjäljestä. Lyhyen ajan sisällä muodostuvan hiilipiikin aiheuttamaa kuormitusta voidaan pitää ilmastonmuutoksen hillitsemisen kannalta ympäristölle haitallisempana, kuin syntyneet päästöt rakennuksen elinkaaren loppupäässä. Energiatehokkaan uudisrakentamisen negatiivista ympäristövaikutusta pidettiin tutkimuksessa merkittävämpänä verrattuna vanhan rakennuskannan hyödyntämiseen ja parantamiseen. (Säynäjoki et al. 2012 ss. 5–8)

Kanadalainen tutkimusryhmä (Lucuik et al. 2010) suoritti vertailevan LCA:n vuonna 1901 käyttöön otetulle nykyään toimistotiloina käytettävälle historialliselle rakennukselle. Tutkimuksessa tarkasteltiin LCA:n avulla kohteen purkavan uudisrakentamisen ympäristövaikutuksia sekä korjausrakentamisen synnyttämiä säästöjä ympäristövaikutuksissa sekä primäärienergiankäytön että ilmastonlämpenemispotentiaalin avulla. Uudisrakennukseksi määriteltiin samankokoinen sekä käyttötarkoitukseltaan samanlainen rakennus kuin korjattava kohde on. Kohteen korjauksessa suoritettiin mm. julkisivun korjaustöitä, eristeiden vaihtoa ja lisäystä, teräspalkkien vaihtoja sekä korjauksia, ikkunoiden vaihdon, muuntajan sekä sähköjärjestelmän vaihdon, yläpohjan eristyksen, hissien vaihdot sekä sisustuksen uusimisen. Elinkaariarvioinnin tuloksena saatiin, että purkavan uudisrakentamisen kokonaisprimäärienergian kulutus olisi 27 434 000 MJ, kun korjausrakentami-

sella välttyttäisiin 27 913 300 MJ:n kulutukselta. Ilmastonlämpenemispotentiaaliksi purkavalla uudisrakentamisella saatiin 1 287 tonnia CO₂-ekv., kun korjausrakentamisen laskettiin säästävän 1 561 tonnia CO₂-ekvivalenttia. Tutkimuksessa vertailtiin myös eri skenaarioin korjattuja sekä uudelleenrakennettuja kohteita, jolloin pienimmät energiankulutuksen sekä päästöjen määrät saatiin korjatulle kohteelle, jonka korjaus oli suoritettu parantamalla kohteen valaistusta sekä lämmitystä kuitenkin hyödyntäen kohteen tilajakoa ja -korkeutta sekä kantavia rakenteita. (Lucuik et al. 2010 ss. 1–4)

Tuotevaiheen ja rakentamisen (A1-5) aikaisen päästöjen muodostamasta hiilipiikistä lähes 90 % muodostuu materiaalivalmistuksesta rakentamisen osuuden jäädessä noin 10 %:iin. Säynäjoen et al. (2011) tutkimuksen mukaan materiaalipäästöistä suurin osa muodostuu betonin ja teräksen valmistuksesta syntyvistä päästöistä. (Säynäjoki et al. 2011 s. 118). Rakennuksen korjauksessa, tuotevaiheessa ja rakentamisessa muodostuvat päästöt ovat pienemmät, kun päästöjä merkittävästi synnyttäviä olemassa olevia raskaita betoni-teräsrunkorakenteita voidaan hyödyntää eikä niiden valmistuksesta muodostu yhtä korkeaa hiilipiikkiä, kuin uudisrakentamisessa. Korjauksen laajuus ja sen sisältämät toimenpiteet ovat suoraan verrannollisia korjausrakentamisen tuote- ja rakentamisvaiheessa muodostuviin päästöihin, mutta aikaisemmat tutkimukset ovat osoittaneet, että riippumatta korjaustoimenpiteiden laajuudesta, on korjausrakentaminen aiheuttama tuote- ja rakentamisvaiheen hiilipiikki uudisrakentamista pienempi. Korjausrakentamisen tuote- ja rakentamisvaiheen hiilipiikin suuruudessa on huomattavaa korjaustoimenpiteiden laajuuden vaihdellessa. Normaalin peruskorjauksen hiilipiikin on havaittu olevan uudisrakentamisten hiilipiikistä jopa 70 % pienempi, kun taas laajennuksia, rakennuksen käyttötarkoitusta ja korkean purkuasteen omaavien korjaustoimenpiteiden sisältämän korjausrakentamisen aiheuttama hiilipiikki on noin 30 % uudisrakentamisen hiilipiikkiä pienempi. Rakennuksen elinkaaren lopussa muodostuu pienempi hiilipiikki purkamisesta ja purkujätteen käsittelystä syntyvistä päästöistä. Purkamisen osuus rakennuksen elinkaaren hiilijalanjäljestä on kohtalaisen pieni. Huuhkan et al. (2021) suorittamassa elinkaaritarkastelussa, purkamisen osuus purkavan uudisrakentamisen elinkaaren hiilijalanjäljestä oli noin 4 %. (Huuhka et al. 2021 ss. 22–23)

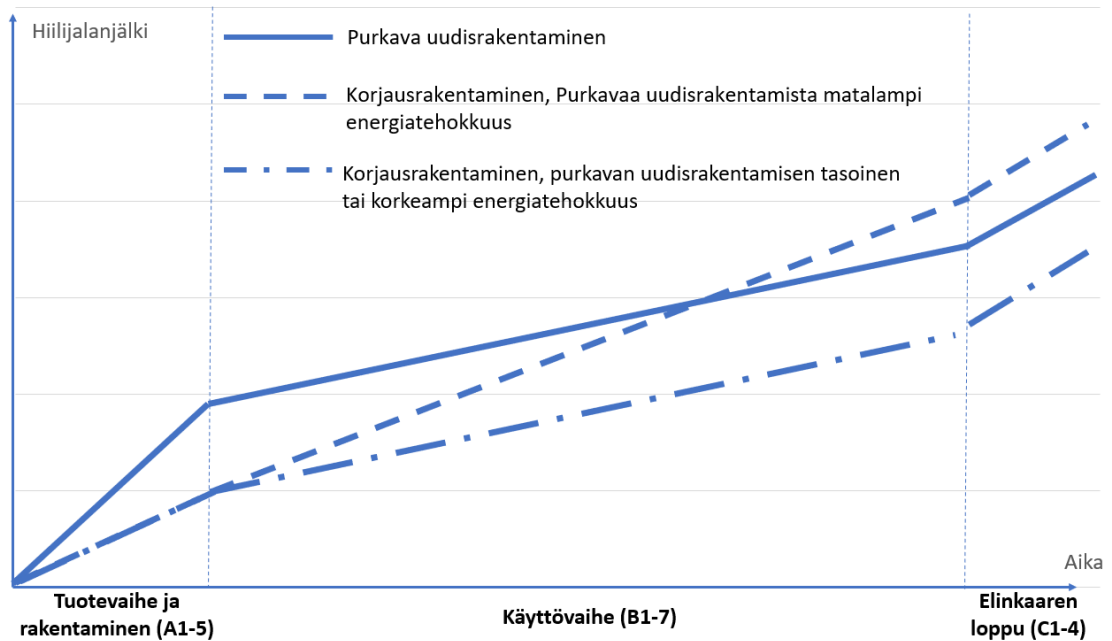


Kuva 3. Periaatekuva rakennuksen elinkaaren aikaisesta hiilijalanjäljestä ajan funktiona (Huuhka et al. 2021 s. 22)

Käytön aikainen hiilijalanjälki muodostuu rakennuksen käytön aiheuttaman energiankulutuksen, mahdollisten korjausten, osien vaihdon sekä huolto- ja kunnossapitotöiden seurauksena. Rakennuksen energiankulutuksen päästöissä huomioidaan yleensä rakennuksen lämmityksestä, jäähdytyksestä ja kiinteistösähkön kulutuksesta syntyvät päästöt. Huolto- ja kunnossapitotöiden osuus käytön aikaisesta hiilijalanjäljestä on kohtuullisen pieni, tutkimuksissa yleensä muutaman prosenttiyksikön luokkaa. Huolto- ja kunnossapitotöiden osuus korjaus- ja purkavassa uudisrakentamisen hiilijäljestä on yleensä samaa suuruusluokkaa. Sekä purkavan uudisrakentamisen että korjausrakentamisen käytönaikainen hiilijalanjälki muodostuu suurimmaksi osaksi käytön aikaisesta energiankulutuksesta, jolloin energiatehokkuuden tasolla on merkittävä vaikutus käyttövaiheessa muodostuvaan hiilijalanjälkeen. Suurimmassa osassa tarkasteltuja tutkimuksia, korjausrakentamisen sekä uudisrakentamisen energiatehokkuuden taso on sama. Rakennuksen lämmitystapa vaikuttaa merkittävästi käyttövaiheen aikaiseen hiilijalanjälkeen, jolloin maalämmöllä lämmitetyn uudisrakennuksen käytön aikaiset päästöt on jopa 70 % pienemmät verrattuna kaukolämpöverkkoon liitetyn peruskorjatun ja korotetun rakennuksen. Liittämällä korjauskohde myös maalämpöön, saataisiin korjausrakennuksesta uudisrakennusta vähäpäästöisempi. Kohteen energiatehokkuuteen merkittävästi vaikuttavien tekijöiden (esimerkiksi paikallinen energiantuotanto), ei ole havaittu vaikuttavan rakennusvaiheen päästöihin. (Huuhka et al. 2021 s. 25–26) Näin ollen kohteen korjaaminen energiatehokkaaksi, ei lisää merkittävästi rakennusvaiheen päästöjä, mutta pienentää korjaushankkeen käyttövaiheen hiilijalanjälkeä.

Korjaustoimenpiteiden laajuus vaikuttaa merkittävästi käytönaikaisen hiilijalanjäljen suuruuteen. Tutkimuksissa on huomattu, että vain pienillä korjaustoimenpiteillä korjatulla kohteella käytön aikainen hiilijalanjälki voi olla jopa 80 % suurempi verrattuna uudisrakentamiseen. Peruskorjauksen on laskettu pienentävän rakentamisvaiheen hiilipiikkiä noin 30 %, mutta käytönaikainen hiilijalanjälki on uudisrakentamiseen verrattuna noin viidenneksen suurempi. Toisaalta hajonta on suurta saaduissa tuloksissa korjauksiin liittyvien toimenpiteiden sekä kohteiden korjausasteen vaihdellessa. Tehdyissä tarkasteluissa, korjausrakentamisessa on päästy uudisrakentamisen käytönaikaisen hiilijalanjäljen tasolle, jos korjauskohteen käyttötarkoitusta on muutettu tai korjauksissa on säilytetty ainoastaan runko. Näissä tapauksissa kuitenkin korjaamisen tuote- ja rakentamisvaiheen hiilijalanjäljen osuus verrattuna uudisrakentamisen hiilijalanjäljen osuuteen on lähes puolet. Samaan tuote- ja rakentamisvaiheen osuuteen päästään, jos rakennusta on laajennettu peruskorjauksen yhteydessä, jolloin korjausrakentamisen käytön aikainen osuus on uudisrakentamiseen verrattuna noin kymmenyksen suurempi. (Huuhka et al. 2021 s. 26)

Korjausrakentamisen vähäpäästöisyyteen ja sen vertailtavuuteen uudisrakentamisen päästöihin vaikuttaa merkittävästi se, että saadaanko korjauskohteen energiatehokkuutta ja energiankulutusta uudiskohteen tasolle. Jos korjauskohteen energiankulutuksen taso on verrattavaa uudiskohdetta korkeampi, arvioi Huuhka et al. tutkimuksessaan, että korjauskohteen elinkaaren aikainen hiilijalanjälki saavuttaa uudiskohteen tason huolimatta tuote- ja rakentamisvaiheen pienemmästä hiilijalanjäljestä huolimatta. Jos korjauskohteen energiatehokkuus saadaan samalle tai paremmalle tasolle kuin uudiskohteen, on koko elinkaarenaikainen hiilijalanjälki korjauskohteessa uudiskohdetta pienempi. (Huuhka et al. 2021 s. 26–28)



Kuva 4. Periaatekuva korjausrakentamisessa saavutetun energiatehokkuuden tason vaikutuksesta elinkaaren aikaiseen hiilijalanjälkeen verrattuna uudisrakentamisen energiatehokkuuden tasoon (Huuhka et al. 2021 ss. 26–28)

Hetki, jolloin korjausrakentamisen hiilijalanjälki saavuttaa uudisrakentamisen, riippuu vahvasti käytönaikaisen energiankulutuksen eron suuruudesta sekä tuote- ja rakentamisvaiheessa tehdyistä hiili-investoinneista. Huuhka et al. tutkimuksessaan viittaavat hiili-investoinnin takaisinmaksuaikaan ajalla, joka uudisrakentamisella kestää tulla vähäpäästöisemmäksi vaihtoehdoksi verrattuna korjausrakentamiseen. Huuhka et al. (2021) suorittamassa kirjallisuustutkimuksessa, noin kolmanneksessa tarkastelluista tapauksista korjausrakentaminen saavuttaa uudisrakentamisen noin 20–30 vuoden kuluttua riippuen myös korjausten laajuudesta. Noin toisessa kolmanneksessa tarkastelluista tapauksista uudisrakentaminen pysyy korjausrakentamista suurempi päästöisenä, vaikka korjausrakentamisen energiankulutus olisi uudisrakentamista suurempaa. (Huuhka et al. 2021 ss. 26–27) Hiili-investoinnin takaisinmaksuaikaan sekä käyttövaiheen päästöihin vaikuttaa merkittävästi oletus siitä, että väheneekö energiantuotannon hiilidioksidipäästöt tulevaisuudessa. Energiatuotannon vähähiilisysolettamaa on tarkasteltu tarkemmin kappaleessa 3.3.

Seuraavassa luvussa tullaan tarkastelemaan strategioita ja niiden sisältämiä menetelmiä sekä mahdollisuuksia saavuttaa korjausrakentamisessa sama tai korkeampi energiatehokkuuden taso. Lisäksi kappaleissa tarkastellaan eri rakennusosien käyttöikää sekä muuntojoustavuuden vaikutusta kohteen korjausmahdollisuuksiin.

3. UUDIS- JA KORJAUSRAKENTAMISEN ELINKAARIIN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT

Vuosien aikana on suoritettu useita tutkimuksia liittyen eri materiaalien, talotyyppien sekä kohteiden elinkaaren aikaisiin päästöihin sekä niiden jakautumiseen elinkaaren eri vaiheisiin (Säynäjoki et al. 2011 s. 116). Myös korjausrakentamisen sekä uudisrakentamisen elinkaaren aikaista hiilijalanjälkeä sekä niiden peilautumista toisiinsa on tarkasteltu ainakin pintapuolisesti (Huuhka et al. 2021 ss. 19–21). Kuitenkaan varsinaisesti toimisto- ja liiketilojen elinkaaripäästöjä vertailevia tutkimuksia on suoritettu vuosikymmenien aikana hyvin vähän. Kuten elinkaaren arviointimenetelmää ja sen vaiheita tarkastelevassa luvussa 2.2 todettiin, on tarkasteltavan kohteen laajuudella, analyysissä tehdyillä rajauksilla ja menetelmillä sekä arviointimenetelmän tavoitteilla vaikutusta saatuihin arviointimenetelmän tuloksiin ja niiden vertailtavuuteen. Aikaisemmissa tutkimuksissa tarkasteltavien kohteiden ilmasto-olosuhteet, energijärjestelmät, laatuvaatimukset sekä rakentamistavat voivat vaihdella, jotka myös vaikuttavat arviointimenetelmistä saatuihin tuloksiin (Huuhka et al. 2021 s. 19). Aikaisemmat tutkimukset ovat nostaneet esiin tiettyjä merkittävimpiä rakennuksen elinkaaren aikaisia päästölähteitä, joita lähemmin tarkastelemalla voidaan tutkia sekä korjaus- että uudishankkeen mahdollisuuksia vaikuttaa elinkaaren aikaisiin ympäristövaikutuksiin sekä mahdollisuuksiin optimoida ja mahdollistaa uudis- ja korjaushankkeiden vertailukelpoisuus.

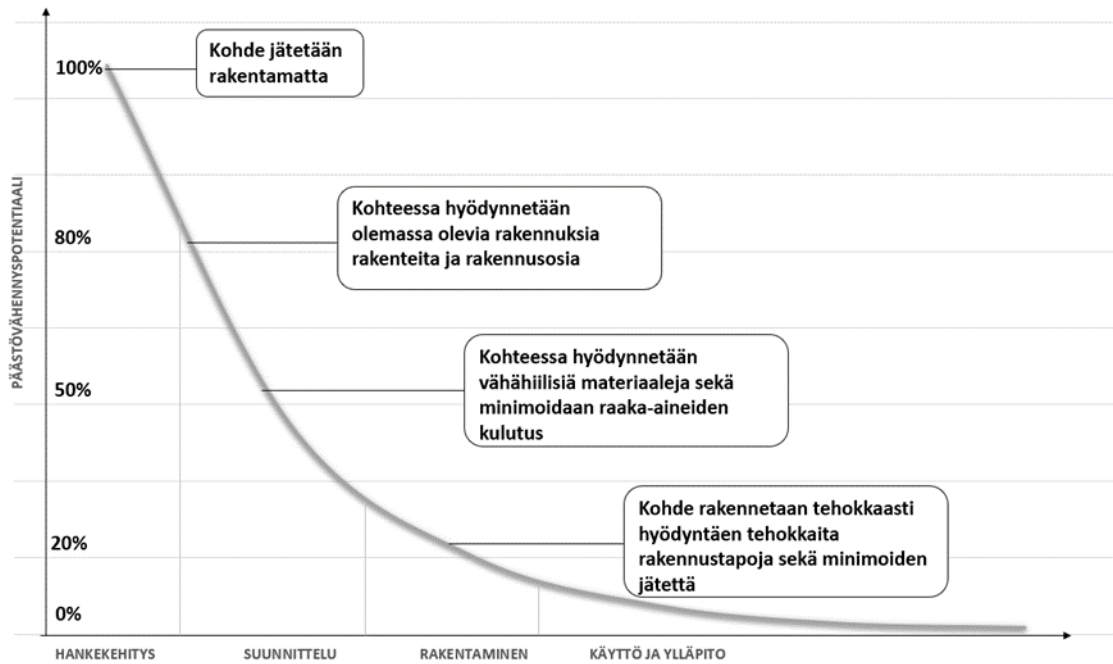
3.1 Uudis- ja korjausrakentamisen keinot vähähiilisyteen

World Green Building Council (2019) arvioi rakennuksen tuote- ja rakennusvaiheen olevan vastuussa yli puolesta elinkaaren aikana muodostuneista päästöistä uudisrakentamisessa, jonka seurauksena useat päästövähennystoimenpiteet kohdistetaan näihin elinkaaren vaiheisiin huomioiden myös käytön aikaisten päästöjen hallinnan. Suurin osa rakennusteollisuuden materiaalien raaka-aineina käytetään raskaan teollisuuden tuotteita, jolloin jo rakennusmateriaalien raaka-aineiden otosta ja käsittelystä muodostuu epäsuorasti huomattava määrä päästöjä. Menetelmät rakennusteollisuuden päästöjen vähennykseen ja minimointiin koskevat koko toimitusketjua ja rakennuksen elinkaareen suorasti ja epäsuorasti vaikuttavia tekijöitä. Asetettuihin päästötavoitteisiin pääseminen vaatii organisaatioiden ja sidosryhmien yhteistyötä vähäpäästöisten ratkaisujen toteuttamiseksi. Toisaalta yhteistyön toteuttaminen ja kestävien ratkaisujen kehittäminen ja toteuttaminen antaa organisaatioille hyötyä kaikissa kestävä kehityksen pilareissa sekä

mahdollistaa johtoaseman kestävänsä rakentamisen markkinoilla. (World Green Building Council 2019 s. 8)

Mahdollisuuksia päästövähennyksiin on koko rakennuksen elinkaaren aikana, mutta hankkeen alkuvaiheessa hanke- ja suunnitteluvaiheen aikaisilla päätöksillä on suurin päästövähennyspotentiaali sen pienentyessä lineaarisesti rakennuksen elinkaaren aikana. Päästötavoitteiden saavuttamiseksi rakennushankkeen eri vaiheista ja elinkaaren ajalta on tunnistettu neljä keskeistä menetelmää, jotka toimivat pohjana ja lähtökohtina päästövähennyksiin: 1. Estä ja ehkäise 2. Vähennä ja optimoi 3. Suunnittele tulevaisuuteen 4. Kompensoi. Tehokkaimpana keinona täyden päästövähennyspotentiaalinsa saavuttamisena toimii se, ettei rakenneta ollenkaan uutta. Hankkeen kehitysvaiheessa tulisi selvittää hankkeen todellinen tarve sekä tarkastella hankkeen toteutusratkaisuja erityisesti kestävänsä rakentamisen menetelmät ja tavoitteet huomioiden. Hankkeen tavoitteiden määräytyttyä, hanke- ja suunnitteluvaiheessa voidaan rakentamisen määrällä ja laadulla vaikuttaa hankkeen saavuttamaan päästövähennyspotentiaaliin. Ratkaisujen kierrätettävyys, uudelleenkäyttöaste ja materiaalien vähähiilisyys vaikuttavat saavutettuihin päästövähennyksiin. Mahdollisimman korkean vähennysasteen saavuttamiseksi hankkeissa tulisi hyödyntää mahdollisimman paljon jo olemassa olevia rakenteita ja materiaaleja sekä priorisoida mahdollisimman vähäpäästöisiä kestävänsä kehityksen mukaisia materiaaleja. Myös rakentamisen aikainen tehokkuuden ja syntyvän jätteen minimoinnin mahdollistaminen tulisi huomioida. Suunnittelussa tulisi huomioida koko elinkaaren aikaiset vaikutukset sekä mahdollisuudet korjata ja ylläpitää tiloja sekä rakenteita. Tilojen muuntojoustavuus sekä tilatehokkuus mahdollistavat myös mahdollisimman pitkän rakennuksen elinkaaren. Jo hankkeen alkuvaiheessa tulisi asettaa tavoitteet kohteen elinkaaren lopulle, jolloin rakenne- ja materiaaliratkaisujen valinnassa materiaalien kierrätettävyys sekä uudelleenkäyttömahdollisuudet tulisi huomioida jo hankekehitys- ja suunnitteluvaiheessa, jotta elinkaaren lopun päästövähennyspotentiaali saadaan maksimoitua. Hankkeen mahdollisimman suurien päästövähennysten saavuttamiseksi on päästöjen kompensointi yksi menetelmä. (World Green Building Council 2019 ss. 20–21; HM Treasury 2013 s. 11)

Menetelmiä päästöjen kompensointiin ovat esimerkiksi rakennuksessa tai tontilla tuotettu ylimääräinen uusiutuva energia, esimerkiksi aurinkopaneeleilla. Lisäksi rakennuksen hiilikädenjälkeä, eli rakennuksen aikaansaamaa positiivista ilmastovaikutusta voidaan kasvattaa myös suunnittelun toimenpiteenä tunnistetun materiaalien kierrätyksen tai uudelleenkäytön avulla. Myös tiettyihin materiaaleihin sitoutunut eloperäinen hiili sekä mahdollisesti elinkaaren aikana materiaalin sitoutuva ilmankehän hiilidioksidi kasvattaa rakennuksen hiilikädenjälkeä. (Rakennusteollisuus RT 2020b ss. 9–10)



Kuva 5. Periaatekuva hankkeen kehitys-, suunnittelu ja rakentamisvaiheen päästöjen vaikutuksista saavutettuun päästövähennyspotentiaaliin (World Green Building Council 2019 ss. 20–21; HM Treasury 2013 s. 11)

Eri valtiot, kunnat ja kaupungit sekä toimialat ja organisaatiot ovat asettaneet itselleen tavoitteita ja strategioita vähähiilisyden saavuttamiseksi. Hallituksen hiilineutraali Suomi 2035 tavoitteen pohjalta Rakennusteollisuus RT yhdessä ympäristöministeriö ja työ- ja elinkeinoministeriön sekä eri sidostyhmiä kanssa ovat laatineet vähähiilisyden tiekartan (2020b). Tiekartan työn tuloksena muodostettiin käsitys toimialan päästövähennysmahdollisuuksista, vähähiilisyden skenaarioista sekä vähähiilisyttä edistävästä toimenpiteistä.

Taulukko 1. *Tunnistettuja menetelmiä rakennetun ympäristön hiilijalanjäljen pienentämiseen ja hiilikädenjäljen vahvistamiseen (Rakennusteollisuus RT 2020b ss. 10–11; World Green Building Council 2019 ss. 20–21)*

Elinkaaren vaihe	Menetelmä hiilijalanjäljen pienentämiseen	Menetelmä hiilikädenjäljen vahvistamiseen
Suunnittelu (ennen elinkaarta)		
Maankäyttö	-Päästövähennyksiä syntyy tehokkaalla maankäytön suunnittelulla	
Materiaali- ja teknologiavalinnat	-Energiatehokkuuden kehittäminen ja edistäminen	
Hankekehitys ja -suunnittelu	-Kohteen tavoitteiden asettaminen huomioiden koko hankkeen elinkaaren mahdollistaen vähäpäästöisten ratkaisujen toteuttamisen	
Tuotevaihe (Rakennusmateriaalit)		
Betoni/sementti	-Uusiutuvan energian käyttö -Vaihtoehtoiset raaka-aineet -Kierrätys	-Hiilen sidonta karbonatisoitumisen avulla
Teräs	-Valmistusprosessin kehittäminen -Koksin korvaaminen vedyllä	-Kiertotalouden mahdollistaminen rakenteissa
Puu	-Valmistusprosessin kehittäminen -Soveltuviin kohteisiin materiaalin käytön lisääminen	-Rakenteiden hiilivaraston vahvistaminen
Bitumi	-Vaihtoehtoisten materiaalien käyttö ja kehittäminen	
Rakentaminen		
	-Toimintojen sähköistäminen -Energiatehokkuuden lisääminen rakentamisessa -Lämmitysratkaisujen kehitys	-Uusiutuvan energian pientuotannon lisääminen -Ostoenergian vähentämiseksi lämmitysratkaisut rakennuskohtaisiksi
Käyttövaihe		
	-Toimintojen sähköistäminen -Energiatehokkuuden lisääminen rakentamisessa -Lämmitysratkaisujen kehitys -Korjausrakentaminen -Tehokas ylläpito	-Infralla tiepäällysteiden kunnostaminen (lisää päästöjä nopeuksien kasvaessa, vähentää vierintävastuksen pienentyessä -Käytönaikainen energiantuotanto
Elinkaaren loppu		
	-Kierrätys -Toimintojen sähköistäminen -Uusiutuvan energian käyttö	-Kiertotalous

Ympäristöministeriö julkaisi 2020 laajan yhteistyön tuloksena sekä EU:n energiatehokkuusdirektiivin muutoksen (2018/44/EU) toimeenpanemiseksi pitkän aikavälin strategian korjausrakentamisen menetelmistä olemassa olevan, ennen vuotta 2020 rakennetun, rakennuskannan saattamiseksi erittäin energiatehokkaaksi ja vähähiiliseksi vuoteen 2050 mennessä. Päästöistä 40 % vähenee strategian mukaan vuoteen 2050 fossiilisten polttoaineiden käytön luopumisen seurauksena lämmityksessä sekä energiantuotan-

nossa. Olemassa olevan rakennuskannan energiatehokkuuden parantamisen on arvioitu vähentävän päästöjä 20 %. Olemassa olevien ja vanhojen rakennusten poistuman sekä tilatehokkuuden parantamisen on arvioitu tuottavan noin 30 % päästövähennyksen. (ym.fi 2020). Rakennusten poistuman ajurina toimii keskeisesti Suomen sisäinen muutoliikkeen aiheuttamien tilojen tyhjilleen jäämisen tai vajaakäytön seurauksena. Rakennuksien poistumaa edistää myös erityisesti muuttovoittoisilla alueilla toiminnallisen epäkelppoisuuden ja taloudellisten tekijöiden vuoksi. Kaupunkirakenteen tiivistämistä, palveluverkkoja sekä tilatehokkuutta ohjaavat strategiat vaikuttavat tilojen käyttöasteeseen ja tarpeeseen ja tämän myötä vajaakäytön seurauksena purkamistarpeeseen. Korjausrakentamisen strategiaan keskeisesti toimenpiteeksi on nostettu suunnitelmallinen kunnossapito, jossa pitkällä aikataimella sovitaan toimenpiteet kiinteistön yllä- ja kunnossapitoon liittyvistä toimenpiteistä turvallisen ja terveellisen sekä energiatehokkaan kiinteistön elinkaaren varmistamiseksi. Suunnitelmallisella kunnossapidolla varmistetaan kiinteistön elinkaarelle asetettujen tavoitteiden sekä laatuvaatimusten täyttyminen. Pitkän aikavälin strategiassa on kuvattu myös eri rakennustyyppien keskeisiä korjaustoimenpiteitä. Lämmityksen päästövähennykset tulevat ei-asuinrakennuksilla pääosin energiatehokkuuden päästötavoitteiden kautta. (Ympäristöministeriö 2020 ss. 26–27)

POISTUMA JA TILATEHOKKUUS	SUUNNITELMALLINEN KUNNOSSAPITO	KORJAUS-TOIMENPITEET	VÄHÄHIILINEN LÄMMITYS
Kiinteistöihin kohdistettujen toimenpiteiden valinta alueellisen väestön- ja kaupunkikehityksen sekä palveluverkko- ja tilatehokkuusstrategiat huomioiden	Kiinteistön kunnossa- ja ylläpidon suunnittelu kiinteistön elinkaarelle asetettujen tavoitteiden sekä turvallisuus- ja terveellisyysvaatimusten täyttämiseksi	Korjaustoimenpiteiden kohdentaminen kiinteistön energiatehokkuuden parantamiseksi ja energiatehokkuustavoitteiden saavuttamiseksi	Kiinteistöjen vähähiilisen lämmityksen suosiminen mahdollistaminen laitteistojen uusimisella niiden teknisen käyttöiän päätyttyä

Kuva 6. Korjausrakentamisen pitkän aikavälin strategian mukaiset toimenpiteet vuoteen 2020 mennessä valmistuneen rakennuskannan muuttamiseksi erittäin energiatehokkaaksi ja vähähiiliseksi (Ympäristöministeriö 2020 ss. 26–33)

Energiatehokkuuden päivittäminen ja parantaminen korjausrakentamisen yhteydessä mahdollistaa kustannustehokkaita ratkaisuja päästövähennyksiin energiankulutuksen vähenemisen kautta (Rakennusteollisuus RT 2020b). Ei-asuinrakennusten kustannustehokkaimmiksi toimenpiteiksi muuttua rakennuksien rakennuskantaa erittäin energiatehokkaaksi sekä lopulta vuoteen 2050 mennessä vähähiiliseksi on tunnistettu erityisesti

ilmanvaihtoon sekä valaistukseen liittyvät toimenpiteet. Kohdekohtaiset korjaustoimenpiteet voidaan suorittaa kerralla (deep renovation) tai vaiheittain rakennusosia kerrallaan (staged deep renovation). Rakennusosien erilaisten käyttöikien vuoksi korjauskohteissa yleisempää on rakennusosien korjaaminen eri vaiheissa rakennusosia kerrallaan. Haasteeksi osittaisessa rakennusosien korjaamisessa nousee esiin suunnitelmien yhteensovittaminen sekä erityisesti talotekniikan järjestelmien yhteistoiminta. Muita tunnistettuja haasteita liike- ja toimistorakennuksien energiatehokkuuden ja sen myötä hiilidioksidipäästöjen vähentämisessä on korjausten ja eri rakenneosien korjausajankohtien yhteensovittaminen vuokralaisten vuokrasopimuksiin. Lisäksi vuokralaisten keskuudessa on tunnistettavissa haluttomuutta sitoutua vanhemman rakennuskannan tiloihin, joka näkyy vanhempien tilojen vajaakäyttönä. (Ympäristöministeriö 2020 ss. 32–33) Mahdolliset korjaustoimenpiteet ja niistä aiheutuva korjausaikainen vajaakäyttö aiheuttaa vuokraajalle vuokratulojen menetyksen, mutta voi toisaalta mahdollistaa suuremmat vuokratuotot korjaustoimenpiteiden jälkeen.

3.2 Rakennusmateriaalit ja -tuotteet ja niiden tekninen käyttöikä

Materiaaleista syntyvien päästöjen muodostuessa pääosin kantavista rakenteista, täydentävistä rakenteista sekä perustuksista (Ruuska & Häkkinen 2015 ss. 317–318), on luonnollista kohdistaa toimenpiteet vähähiilisyiden tavoitteluun näihin rakennusosiin ja -materiaaleihin rakennuksen energiatehokkuuden parantamisen lisäksi. Rakennuksen elinkaaren tarkastellaan usein kestävän 50 tai 100 vuotta. Rakennusosilla ja materiaaleilla on eri käyttöikä, jonka seurauksena niitä joudutaan vaihtamaan ja korjaamaan rakennuksen elinkaaren aikana. Ruuska & Häkkinen (2015) arvioivat talotekniikan, ikkunoiden ja ovien, lasitusten ja kylpyhuoneiden korjausten ja vaihtamisten aiheuttavan noin 18 % rakennuksen koko elinkaaren aikaisista päästöistä, joista noin 17 % muodostuu materiaalien osuudesta. Huuhkan et al. (2021) suorittaman peruskorjatun ja uudisrakennetun koulun vertailussa, n. 14 % korjausrakentamisen elinkaaren aikaista päästöistä muodostuu tuote- ja rakentamisvaiheesta, kun uudisrakentamisessa saman vaiheen osuus on noin 44 % (Huuhka et al. 2021 ss. 45–46).

Säynäjoen et al. (2011) asuinkerrostalon päästöjä tarkastelevassa tutkimuksessa merkittävimmät päästölähteet olivat 11 % osuudella betoni, 8 % osuudella energian käyttö ja 6 % osuudella teräs. Myös tiili- ja puurakenteilla oli kohtuullinen päästövaikutus. Tutkimuksessa betonin, teräksen ja energian käytön osuus koko tarkasteltavan kohteen päästöistä oli yli kolmannes. Ruuskan ja Häkkisen (2013) suorittamassa tutkimuksessa tarkasteltaessa rakennuksen osille jakautuneita päästöjä, 35 % päästöistä muodostui

betonisista runkorakenteista. Noin 16 % päästöistä muodostui täydentävistä rakenteista. Molemmissa tutkimuksissa talotekniikan järjestelmillä oli osuudeltaan pieni päästövaikutus. (Säynäjoki et al. 2011; Ruuska & Häkkinen 2013)

Korjauksen seurauksena saavutetut hyödyt energiatehokkuuden paranemisessa voivat alentaa elinkaaren aikaisia päästöjä, kuten luvussa 3.1 todettiin. Kohteen korjaustarpeisiin vaikuttaa merkittävästi kohteen ikä, käyttötarkoitus, rakennetekniset ratkaisut sekä elinkaaren aikana suoritettavat kunnossa- ja ylläpitotyöt. Kestävien, pitkäikäisten sekä kiertettävien materiaalien ja rakenneosien käytöllä on mahdollista saavuttaa päästövähennyksiä elinkaaren aikaisten materiaalipäästöjen pienentyessä (Ruuska & Häkkinen 2015 s. 327).

Rakennusten perustusten kestävyys vaikuttaa niiden valmistusmateriaali sekä perustusolosuhteet. Normaaleissa perustusolosuhteissa anturaperustusten, betoni- tai teräspalkkien sekä laattojen ja sokkeleiden keskimääräinen tekninen käyttöikä on rakennuksen iän verran. Pinnoitteiden, halkeamien ja sortumien korjaamisia sekä paikkauksia suositellaan tehtäväksi kahdenkymmenen vuoden välein. Suunnitemallisessa kunnossapidossa keskeistä on myös viiden vuoden välein suoritettavat silmämääräiset tarkastukset. Myös rakennuksen runkorakenteiden keskimääräinen käyttöikä on rakennuksen iän verran. (RT 18-10922 2008 ss. 4–6)

Rakennuksen elinkaaren aikaiset korjaukset ja rakennusosien vaihdot koskevat pääosin tilojen jako-osia (ovet ja ikkunat, kevyet väliseinät), pintarakenteita sekä talotekniikkaa riippuen korjauskohteen korjaustarpeesta. Tämän lisäksi parannettaessa kohteen energiatehokkuutta voidaan eristeitä vaihtaa tai lisätä sekä kohteen käyttötarkoituksen muuttuessa korjaustoimenpiteet voivat kohdistua väliseinärakenteisiin. Myös julkisivujen kunnossapito- ja parantamistyöt ovat yleisiä. Tiiliverhoiltujen ja rapattujen julkisivujen tekninen käyttöikä on olosuhteista riippuen 50 tai 70 vuotta, hyvissä olosuhteissa tiiliverhous voi kestää koko rakennuksen iän verran. Betoniset sekä metalliverhoiltujen julkisivujen keskimääräinen tekninen käyttöikä normaalissa rasitusluokassa on noin 40 vuotta. Kestävimmät julkisivumateriaalit tekniseltä käyttöikältään ovat hirsipinta, tiiliverhous sekä luonnonkiviverhous. Ikkunoiden keskimääräinen käyttöikä puuikkunoilla on noin 50 vuotta ja puualumiini-ikkunoilla 60 vuotta. Ikkunoiden tiivistäminen tulisi suorittaa 3–12 vuoden välein, jotta riittävä ikkunoiden ja tämän myötä ulkovaipan tiiviys ylläpidetään. Väliseinillä tekninen käyttöikä on yleensä rakennuksen iän verran, ellei tilan käyttömuiden seurauksena ole tarvetta purkaa tai korjata väliseinärakenteita. (RT 18-10922 2008 ss. 6–7)

Talotekniikan osalta korjaustarve ja ylläpidon toimenpiteet ovat riippuvat kohteen lämmitysjärjestelmästä, vesi- ja viemärijärjestelmistä, ilmanvaihtojärjestelmistä, kylmäteknisistä järjestelmistä, kaasujärjestelmistä, palontorjuntajärjestelmistä, sähkö- ja tietojärjestelmistä sekä muista mahdollisista LVI-järjestelmistä. Lämmitysjärjestelmien yleisimmät käyttöiät ovat noin 30–50 vuotta sisältäen säännölliset huollot. Ilmanvaihtojärjestelmien tekninen käyttöikä ei yleensä täyty ennen kuin ilmanvaihtokoneiden toimintaperiaatteisiin tai käyttötarkoituksiin tulee muutoksia. Palontorjuntajärjestelmien tekninen käyttöikä suunnitellaan yleisesti rakennuksen iän mukaan. Eri järjestelmien sisältämät tulisi uusien järjestelmien vaihdon yhteydessä. (RT 18-10922 2008 ss. 13–32)

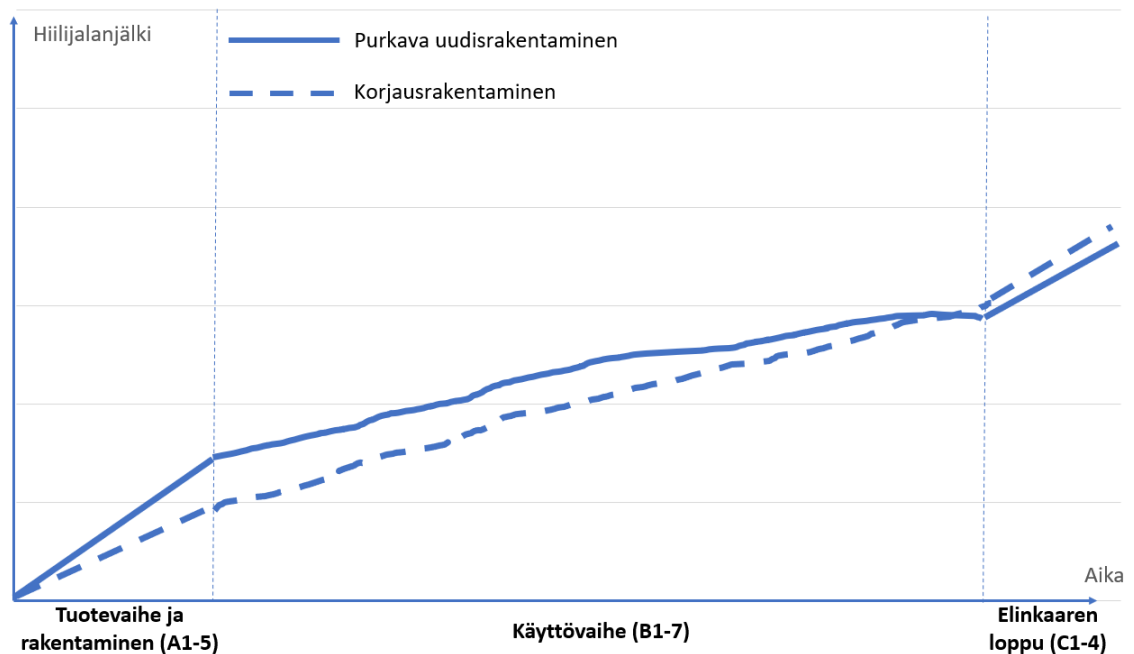
Kestävien ja ylläpidettävien rakenteiden ja materiaalien valinnalla mahdollistetaan niiden tehokas käyttö läpi hankkeen elinkaaren sekä materiaalien käyttöiän. Kestävillä materiaalivalinnoilla vähennetään korjaus- ja vaihtotarpeita sekä parannetaan käyttötehokkuutta samalla minimoiden materiaalien ja rakenteiden negatiivisia ympäristövaikutuksia. Korjausten ja vaihtojen määrän minimointi sekä rakenteiden suunnittelu muuntojoustaviksi sekä uudelleenkäytettäviksi minimoi syntyvän kaatopaikalle sijoitettavan jätteen määrää sekä vähentää koko elinkaaren aikaisten päästöjen syntymistä. Keskeinen tekijä materiaalien kestävyuden varmistamisessa on myös niiden suunnitelmallinen huolto. (SFS-EN ISO 20887: 2020 s. 7)

3.3 Elinkaaren aikainen energiatehokkuus ja energiankulutus

Rakennetun ympäristön osuus koko Suomen energiankulutuksesta oli vuonna 2007 59 % sen kattaessa kasvihuonepäästöistä 56 % (Sekki et al. 2016 s. 199). Vuonna 2018 tuli voimaan energiatehokkuusdirektiivin muutos (2018/44/EU), jossa määrättiin kaikkien uusien rakennusten toteutus uusien rakennusten nollaenergisydestä (2010/31/EU). Vuonna 2020 julkaistiin Suomen ilmoitus energiatehokkuusdirektiivin suositusten mukaisesti pitkän aikavälin strategia korjausrakentamisen muuttamiseksi erittäin energiatehokkaaksi sekä lähes hiilivapaaksi (Ympäristöministeriö 2020). Vuoden 2020 jälkeen kaikkien rakennettujen rakennuksien tulisi olla lähes nollaenergiarakennuksia. Uudisrakennusten täyttäessä valmistuessaan energiatehokkuuden tason tavoitteet, energiatehokkuuden parantamisen strategiat koskevat pääosin korjausrakentamista. (Ympäristöministeriö 2020 s. 2)

Energiankulutuksen vähentäminen sekä uusiutuvien energialähteiden käyttö energiantuotannossa toimivat keskeisinä menetelminä energiankulutuksen ja tämän myötä siitä aiheutuvien kasvihuonepäästöjen vähentämiseen. Ympäristöministeriön arviointimenetelmässä (2019 s. 46) on oletettu sähkön ominaispäästöjen pienenevän viidessäkymme-

nessä vuodessa noin 94 % ja kaukolämmön ominaispäästön hieman yli 80 %. Vähähiilisyyssolettama vaikuttaa erityisesti vähemmän energiatehokkaan rakennuksen käyttövaiheen päästöihin, jolloin voimakkaampi vähähiilistyminen vaikuttaa määrällisesti enemmän kohteeseen, jossa energiatehokkuus on heikompaa. (Huuha et al. ss. 31–32; Ympäristöministeriö 2019 ss. 46–47) Energiantuotannon vähähiilisyyssolettama pienentää siis energiatehokkuuden tason vaikutusta elinkaaren aikaisiin päästöihin pienentäen energiatehokkuuteen liittyvien valintojen ja siinä saavutettavan tason merkittävyyttä. Tässä työssä elinkaaripäästöjen laskennassa ei huomioida energiantuotannon vähähiilisyyssolettamaa.



Kuva 7. Energiantuotannon vähähiilisyyssolettaman vaikutuksesta (vertaa kuva 4) purkavan uudis- sekä korjausrakentamisen elinkaaren hiilijalanjäljen kertymiseen ajan funktiona (Huuha et al. 2021 s. 32)

Euroopan Unionin direktiivissä rakennusten energiatehokkuudesta (2010/31/EU) on asetettu jäsenvaltiot toteuttamaan rakennusten energiatehokkuuden sertifiointijärjestelmä, joka todistuksessa esitetään rakennuksen energiatehokkuus sekä energiatehokkuuden vähimmäisvaatimukset. Todistukseen on direktiivin mukaan sisällytettävä toimenpiteitä energiatehokkuuden parantamiseksi rakennuksessa tai rakennusosissa. Suomessa direktiivi on toimeenpantuna lailla rakennuksen energiatodistuksesta (50/2013) ja Ympäristöministeriön asetuksella rakennuksen energiatehokkuudesta (1048/2017). Laissa on määrätty ilmaisemaan rakennuksen kokonaisenergiankulutuksen taso luokittelustaiteikolla vertailuluvulla, nk. E-luvulla. E-luku ilmaisee vuodessa kulutetun ostoenergian per neliometri (yks. kWh/m²vuosi). (50/2013; 1048/2017)

Hirvonen et al. (2021 s. 2) korostavat energiatehokkuuden parantamisen toimenpiteissä keskeiseksi tekijäksi energiatehokkuuden parantamisen toimenpiteiden kohdentamista korjattavaan kohteeseen, jolloin tulisi huomioida kohteen ominaispiirteet sekä sen ympäristön, kuten ilmaston, asettamat erityisvaatimukset. Rakennuksen energiatehokkuuden parantaminen kustannustehokkaasti näyttäytyy nk. Pareto-tehokkuutena, jolloin sekä energiatehokkuutta sekä kustannustehokkuutta ei kyetä saavuttamaan heikentämättä toista parametria. Riittävien energian käytön ja päästöjen vähennyksen saavuttamiseksi, tulisi toimenpiteet kohdentaa yksittäisiä rakennuksia laajemmin koskemaan koko rakennuskantaa. (Hirvonen et al. 2021)

Rakennusten energiatehokkuusdirektiivin (2018/44/EU) asettamat vaatimukset lähes nollaenergiarakennuksista, tulevat pienentämään käyttövaiheen energiankulutuksesta aiheutuvia päästöjä kasvattaen kuitenkin rakennusvaiheen päästöjen osuutta erityisesti rakennusmateriaalien ja niiden valmistuksen osalta. Energiatehokkuuden parantaminen eristeiden lisäämisellä ja eristepaksuuden kasvattamisella lisää materiaaleihin sitoutuneiden päästöjen määrää. Toisaalta energiatehokkuutta ylläpitävien ja parantavien keskeisimpien rakenteiden ylläpito ja korjaus edistää elinkaaren kestävyttä ja tehokkuutta. Lähes puolet energiankulutuksesta aiheutuu ilmanvaihdosta, noin 10 % ulkoseinistä, 9 % ikkunoista ja 7 % yläpohjista. Lähes 70 % ei-asuinrakennuksien lämmitysenergian kulutuksesta muodostuu kaukolämmöstä aiheuttaen noin 66 % lämmitysenergian kulutuksen päästöistä. Fossiilisten polttoaineiden osuus lämmitysenergian kulutuksesta on noin 20 % päästöjen osuuden ollessa noin kolmanneksen. (Ympäristöministeriö 2020 s. 20; s. 23) Talotekniset järjestelmät sekä hyvin eristetty ulkovaippa kulkevat käsikädessä, jolloin hyvä lämmöneristys mahdollistaa taloteknisten järjestelmien toimivuuden. Hyvin lämmöneristetyllä ulkovaipalla mahdollisesta pienemmät lämmitystekot laitekapasiteetin minimoinnin mahdollistamisella. (Ojanen et al. 2017 s. 27) Keskeisimmät rakennuksen toiminnallista tehokkuutta sekä energiatehokkuutta parantavat toimenpiteet kohdistuvat siis rakennuksen ulkovaippaan, ikkunoihin, oviin ja ulkoseinien rakenteisiin sekä teknisten järjestelmien parantamiseen (Gelfand & Duncan 2012 s. 77).

Erityisesti toimistoissa ja kaupallisissa rakennuksissa teknisiin järjestelmiin kohdistuvilla toimenpiteillä saadaan merkittävämpiä kohteen tehokkuutta parantavia tuloksia aikaseksi verrattuna julkisivun rakenteellisiin korjauksiin. Toimistorakennuksissa sekä muissa suuremmissa kohteissa rakenteita kuluttaa rakennuksen sisällä tapahtuva toiminta, kuten ihmisten toiminta, valaistus ja tekniikan käyttö verrattuna ulkoiseen esimerkiksi säätilojen aiheuttamaan rasitukseen. (Gelfand & Duncan 2011 s. 78) Ympäristöministeriö julkaisi vuonna 2020 korjausrakentamisen pitkän aikavälin strategian rakennusten vähähiilisyyden tavoitteiden saavuttamiseen. Strategiassa on määritelty rakennusten

järjestelmien ja rakennusosien korjaustoimenpiteitä kohteen energiatehokkuuden parantamiseksi (Ympäristöministeriö 2020 s. 32). Toimenpiteet on kuvattu taulukossa 2.

Taulukko 2. Korjaustoimenpiteet ei-asuinrakennusten energiatehokkuuden parantamiseksi (Ympäristöministeriö 2020 s. 32; ss. 34–35; 718/2020)

Järjestelmä tai rakennusosa	Korjaustoimenpide	Järjestelmälle tai rakennusosalle asetetut lainsäädännölliset vaatimukset (valmisteltavana oleva lainsäädäntö merkitty kursivoituna)
Ilmanvaihto	-Ilmanvaihdon uusiminen tarpeenmukaiseksi ja älykkääksi -Lämmöntalteenotto asennetaan uutena tai vaihdetaan tehokkaammaksi	-Lämmön talteenoton vuosihyötysuhteen (poistoilmasta talteen otettava lämpö­ määrän osuus lämmityksen tarvitse­ masta lämpö­määrästä) on oltava vähin­ tään 45 % -Ominais­sähköteho saa olla enintään: -Koneellisen tulo- ja poistoilma­ järjestelmä: 2 kW/(m ³ /s) -Koneellisen poistoilmajärjes­ telmä: 1,0 kW/(m ³ /s) -Ilmastointijärjestelmä: 2,5 kW/(m ³ /s)
Sähkö ja rakennusautomaatio	-LED valaisimet loisteputkien tilalle -Läsnäolo- ja liiketunnistimet -Mahdollinen aurinkopaneelien käyttö ja asennus -Rakennusautomaation asennus ei-asuinrakennuksiin seuraamaan ja analysoimaan kohteen energian käyttöä, tulosten hyödyntämien parantavien toimenpiteiden toteuttami­ seen	-Lämmitys- ja ilmastointijärjestelmiin, joi­ den teho on yli 290 kW on asennettava vuoteen 2025 (korjattavat kohteet vuo­ desta 2021 lähtien) mennessä automaa­ tio- ja ohjausjärjestelmä -Rakennukseen suunniteltavan ja raken­ nettavan automaatio- ja ohjaus- tai pai­ kallisen sähköntuotantojärjestelmän on täytettävä järjestelmän kokonaisenergia­ tehokkuutta, asianmukaista mitoitusta, käyttöä ja asianmukaista ohjaamista sekä oikeaa asentamista koskevia vaati­ muksia (718/2020 4§)
Lämmitys­järjes­ telmä	-Automaatiojärjestelmän uusimisen yhteydessä älykäs lämmityksen oh­ jaus -Lämmitys­järjestelmän tasapainotus	-Hyötysuhdetta parannettava laitteiden ja järjestelmien uusimisen yhteydessä uusittavilta osin -Uusimisen jälkeen lämmöntuottojärjes­ telmän ja tilojen pääasiallisen lämmön­ tuotto- ja -jakojärjestelmien hyötysuh­ teen välisen suhteen oltava vähintään 0,8 -Pääasiallisten lämmöntuotto- tai läm­ mönjakojärjestelmän vuosisuhteen ol­ tava vähintään 0,73 -Uusitun tilan lämmönjakojärjestelmän apulaitteiden sähköenergian kulutus saa olla enintään 2,5 kWh/netto-m ²

Ulko-vaippa	<ul style="list-style-type: none"> -Ulkoseinien lisälämmöneristys, kun ulkoverhous uusimistarpeessa -Ulkoseinien läpimenojen tiivistäminen -Yläpohjaan lisälämmöneristys, jos teknisesti mahdollista -Tasakattoisiin rakennuksiin lisälämmöneristys vesikattokorjauksen yhteydessä -Heikkokuntoisten ikkunoiden vaihto uuteen -Routaeristyksen uusiminen tai lisäys -Varastotilojen katon eristys pohjakerroksissa -Rakenteiden liitokset tiivistettävä niin, että lämmöneristyksen kerrokset suojataan eristyskykyä heikentäviltä vaikutuksilta 	<p>-Korjatun rakennusosan parannettu U-arvo:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ulkoseinä: $U_{\text{korjattu}} = U_{\text{alkuperäinen}} \times 0,5$ (max. 0,17 W/m²K), käyttötarkoituksen muutoksen yhteydessä (max. 0,60 W/m²K) • Yläpohja: $U_{\text{korjattu}} = U_{\text{alkuperäinen}} \times 0,5$ (max. 0,09 W/m²K), käyttötarkoituksen muutoksen yhteydessä (max. 0,60 W/m²K) • Alapohja: Energiatehokkuutta parannetaan mahdollisuuksien mukaan • Ikkunat: Uusien ikkunoiden ja ulko-ovien U-arvo oltava vähintään 1,0 W/m²K, korjatessa lämmönpitävyyttä parannettava mahdollisuuksien mukaan
Vesi- ja viemärijärjestelmä	<ul style="list-style-type: none"> -Vedenpaineen säätäminen -Hanojen ja vesikalusteiden uusiminen vettä säästäviksi -Lämmöntalteenotto jätevedestä, jos rakennuksessa käytetään paljon lämmintä käyttövettä 	<p>-Uusimiseen sovellettava uudisrakentamisen säädöksiä</p>
Vähähiilinen lämmitys ja hiilineutraalius	<ul style="list-style-type: none"> -Fossiilisten polttoaineiden käytöstä luopuminen kiinteistökohtaisessa lämmityksessä, tämän tilalle maalämpö tai muu päästötön energia -Mahdollisuuksien mukaan sähköllä toteutetun jäähdytyksen vaihto kauko- tai maakyilmään 	<ul style="list-style-type: none"> -Kivihiilen käytön lopettaminen energiantuotannossa vuoteen 2029 mennessä -Osa fossiilisesta polttoöljystä korvattava bioöljyllä -<i>Valtion ja kuntien kiinteistöjen öljylämmityksestä luovutaan vuoteen 2024 mennessä</i> -<i>Öljylämmitteisiä kiinteistöjä kannustetaan siirtymään muihin lämmitysmuotoihin erillisellä toimenpideohjelmalla 2020-luvun aikana</i> -<i>Asuinrakennusten kiinteistökohtaisesta öljylämmityksestä luovutaan 2050 mennessä</i>

Koulurakennuksiin suoritetuissa korjaustoimenpiteissä tarkasteltiin toimenpiteiden vaikutusta rakennuksen energiatehokkuuteen sekä rakennuksen elinkaaren aikaiseen hiilijalanjälkeen. Tärkeissä tehdyssä tutkimuksessa koulurakennuksen ulkovaipan ulkoseinät ja yläpohja eristettiin sekä ulkovaipan ikkunat ja ovet vaihdettiin kauttaaltaan. Koulurakennuksen lämmitys- ja käyttövesijärjestelmät uusittiin sekä suurin osa kohteen patteista uudistettiin. Kohteen talotekniikan putket puhdistettiin sekä tarpeen mukaan eristettiin. Toimenpiteiden myötä kohteen lämmitykseen kuluvaa energiaa saatiin pienennettyä noin 69 %:lla. Veden lämmitykseen kuluva energian kulutus laski noin kymmenyk-

sellä. Sähkönkulutus kasvoi noin 4 % korjaustoimenpiteiden myötä. Korjaustoimenpiteiden arvioitiin pienentävän kohteen hiilijalanjälkeä noin 40 % korjaamattomaan tilanteeseen verrattuna. (Sedlák et al. 2015 ss. 2393–2395)

Huuhkan et al. (2021) suorittaman koulurakennukseen kohdistuvan toimenpide- ja elinkaariarvioinnissa tarkasteltiin 1950-luvun massiivitiilirakenteisen kohteen peruskorjauksen vaikutusta kohteen sähkönkulutukseen sekä hiilijalanjälkeen. Kohteen ulkovaippa korjattiin vaihtamalla ikkunat ja ovet sekä sisäilmastoteknisessä korjauksessa lisättiin lämmöntalteenotolla varustettu koneellinen poistoilmanvaihto sekä suoritettiin täydellinen LVIS-saneeraus. Peruskorjattua rakennusta verrattiin korjaamattoman tilanteen lisäksi 2018 valmistuneeseen betonielementtirakenteiseen uudisrakennukseen. Rakennukset simuloitiin tutkimuksessa vertailukelpoisiksi. Peruskorjatussa kohteessa energiankulutus kasvoi korjaamattomaan kohteeseen verrattuna, kuten edellä kuvatussa tutkimuksessa (Sedlák et al. 2015). Koneellinen ilmanvaihto kuluttaa painovoimaista ilmanvaihtoa enemmän sähköä, joka aiheuttaa vertailussa näkyvän kulutuksen nousun. Tutkimuksen tuloksissa todettiin, että uuden rakennuksen E-luku on noin neljänneksen pienempi peruskorjattuun verrattuna. Uudisrakennuksen sähkön osuus ostoenergiasta on peruskorjausta suurempi ja uuden rakennuksen ostoenergia on noin 65 % korjaamattomaan rakennukseen verrattuna, kun peruskorjatun se on 96 %. Energiankulutuksen matalammasta tasosta huolimatta uudisrakennuksen elinkaaren aikainen hiilijalanjälki on noin 4 % peruskorjattua kohdetta suurempi. (Huuhka et al. 2021 ss. 37–46)

Suunnitteluvaiheen ratkaisulla on merkittävä rooli energiatehokkuutta ylläpitävien ja parantavien ratkaisujen integroimisessa osaksi rakennusta. Kuitenkin käyttövaiheen aikaisilla toimenpiteillä erityisesti rakennusautomaatiojärjestelmiin kohdistuvilla säätö- ja ohjaustoimenpiteillä on havaittu olevan huomattavaa potentiaalia käytön aikaisen energiatehokkuuden parantamisessa. Käytönaikainen datan keruu tilojen käytöstä, käyttäjien määrästä, käytön tehokkuudesta sekä tarkasta energiankulutuksesta mahdollistaa energiasäästöt kahdesta syystä: 1) Ymmärryksen ja tiedon lisääminen tarkasta energiankulutuksesta mahdollistaa kohdennettujen kustannustehokkaiden energiatehokkuutta parantavien ratkaisuiden toteuttamisen 2) Rakennuksen automaatiojärjestelmän ohjaus reaaliaikaisen käyttödatan pohjalta mahdollistaa ylimääräisen valaistuksen, lämmityksen ja jäähdytyksen aiheuttaman energiankulutuksen minimoimisen reaaliajassa. (Sekki et al. 2017 s. 127) Erityisesti tiloissa, joissa käyttöasteet ovat ainutlaatuisia sekä vaikeasti ennakoitavissa, kasvaa energiankulutuksen reaaliaikaisen datan keruun ja analysoinnin merkitys (Sekki et al. 2015 s. 247).

Sekki et al. tutkimuksissaan (2015; 2016; 2017) tarkastelivat koulujen sekä päiväkotien energiankulutusta, tilatehokkuuden ja käytön vaikutusta energiankulutukseen ja -tehokkuuteen sekä mahdollisuuksia erilaisten indikaattorien käyttöön energiatehokkuuden arvioinnin yhteydessä. Rakennuksen käytön tehokkuudella havaittiin olevan vaikutusta rakennuksen energiankulutukseen. Tutkittaessa erityyppisiä rakennuksia, havaittiin uusien rakennusten kuluttavan vanhempia kohteita vähemmän energiaa lämmitykseen. Lämmitysenergian käytön vähentyessä havaittiin primäärienergian käytön kasvavan rakennuksissa, jonka uskotaan olevan seurausta tilojen käytön kasvusta. Sama trendi havaittiin korjattujen rakennuksien yhteydessä, jolloin tilojen käytön tehokkuuden kasvaessa, ilmanvaihdon ym. tarpeen kasvu lisäsi myös primäärienergian kulutusta. (Sekki et al. 2015 ss. 247–248)

Rakennuksen käytön tehokkuuteen vaikuttaa tilatehokkuus mitattuna käytössä oleva neliö per henkilö ($m^2/hlö$) sekä tilojen käyttöaste, joka määräytyy käytön tuntien (h/d , h/vko , h/a) ja käytön tason mukaan (% tilojen käyttäjistä paikalla tietyllä hetkellä). (Sekki et al. 2015 ss. 247–248) Tyypillisesti rakennuksen energiatehokkuutta on kuvattu yksiköllä kWh/m^2 , joka soveltuu hyvin teknisten ratkaisujen energiatehokkuuden tarkkailuun ja vertailuun erityisesti suunnitteluvaiheessa. Kyseinen energiatehokkuuden indikaattori ei kuitenkaan huomioi tilojen käyttöä ja käytön tehokkuutta. Rakennus, jota käytetään vähemmän ja tehottomammin voi näyttää energiatehokkaammalta yksikössä kWh/m^2 verrattuna rakennukseen, jota käytetään tehokkaammin ja enemmän, poistaen lisärakentamisen tarvetta muualta. (Sekki et al. 2017 s. 125) Tutkimuksissaan Sekki et al. (2015; 2016; 2017) kehittivät tilojen käytön tehokkuuden huomioivat energiatehokkuuden indikaattorit (EIU, SECo ja SECu,s). Vaihtoehtoisten rakennuksen energiatehokkuutta kuvaavien indikaattoreiden tarkempi kuvaus, sovelluskohteet sekä hyödyt ja haitat kuvattu taulukossa 3.

Taulukko 3. Vaihtoehtoiset energiatehokkuutta kuvaavien indikaattoreiden kuvaukset (Sekki et al. 2015; 2016; 2017)

Vaihtoehtoinen indikaattori	Yksikkö	Sovelluskohteet ja ominaisuudet
Specific energy consumption (SEC) <i>suom. Tarkka energiankulutus</i>	kWh/m^2	Soveltuu eri teknisten ratkaisujen arviointiin ja vertailuun suunnitteluvaiheessa, hyödyllinen kun käyttäjien määrä ja profiili ei tiedossa. Joissain tilanteissa saa vähemmän käytettävät kohteet näyttämään energiatehokkaimmilta
Energy intensity of usage (EIU) <i>suom. Käytön energaintensiteetti</i>	$kWh/n_{hlö}$, ($n_{hlö}$ =tilojen käyttäjien lukumäärä) kWh/h_a, (h_a =käyttötunnit vuodessa)	Soveltuu käyttöön erityisesti olemassa olevien rakennusten käyttötehokkuutta arvioitaessa sekä tehdessä tilamuutoksia ja niiden vaikutusten arvioinnissa. Ei huomioi energiankulutuksen suhdetta rakennuksen pinta-alaan

Specific energy consumption adjusted for occupancy (SEC_o) <i>suom. Käyttöasteeseen mukautettu tarkka energiankulutus</i>	kWh/m²o (0 ≤ o ≤ 1) o = todellisten käyttötuntien ja korkeimpien mahdollisten käyttötuntien välinen suhde	Soveltuu suhteelliseen käyttöön perustuvaan energiankulutuksen arviointiin. Ongelmana käyttöasteen tarkastelu vain suhteellisesti, ei todelliseen käyttöön perustuen. Lisäksi korkeimmat mahdolliset käyttötunnit (esim. 24h/pv) ei ole kaikissa tilanteissa optimaalisia
Specific energy consumption adjusted for usage and space efficiency (SEC_{u,s}) <i>suom. Käyttöön ja tilatehokkuuteen mukautettu tarkka energiankulutus</i>	kWh/m²u, $u = n t_{avg} / ((A/a_{ref}) t_{ref})$ (n=todellisten käyttäjien lukumäärä, t_{avg} =päivittäinen tiloissa vietetty keskiarvoaika per käyttäjä, A=tarkasteltava pinta-ala, a_{ref} =tilatehokkuuden mitoitusarvo (m ² /hlö) t_{ref} =työskentelyaikojen mitoitussarvo (esim. 9h/pvä))	Soveltuu arvioimaan sekä tilan ja sen tehokkuuden, että käyttöasteen vaikutusta kohteen energiankulutukseen muodostaen yhdistelmän teknisen ja tehokkaan käytön aikaansaamat energiatehokkuudet. Soveltuu heikosti olemassa oleviin rakennuksiin, mutta lisäämällä reaaliaikaisen käytön ja käyttöasteen mittaamista, helpotetaan energiatehokkuuden laskentaa myös käyttövaiheessa

Eri indikaattoreilla suoritetuissa laskelmat tukevat tehokasta tilan käyttöä ottaen huomioon tilojen tehokkaan käytön vaikutukset energiankulutukseen. Indikaattorien käyttö on edellytys nykyisen energiankäytön mittaamiselle, mutta myös kehitysmahdollisuuksien tunnistamiselle. Energiansäästötoimenpiteissä voidaan saavuttaa merkittäviä vaikutuksia ainoastaan, jos ne pohjautuvat reaaliaikaisiin tuloksiin. Tämän myötä on kriittistä kehittää ja käyttää indikaattoreita, jotka huomioivat tilojen todellisen käytön ja muutokset mahdollisessa käytössä. (Sekki et al. 2015 s. 256; 2016 s. 205)

3.4 Tilojen muuntojoustavuus ja monikäyttöisyys

Rakennuksen ja sen tilojen muuntojoustavuus kuvaa tilojen kykyä mukautua tilojen käyttötarkoituksen tai olosuhteiden muutoksiin sekä tarpeisiin muuttaa tiloja vastaamaan päivittyntä käyttötarkoitusta ja tilojen käyttäjien tarpeita. Muuntojoustavalla suunnittelulla varaudutaan kohteen käyttöön ja kestävyteen liittyviin epävarmuuksiin mahdollistaen kohteen tehokkaan käytön sallien käyttövaiheen aikaiset muutokset vastaten tilojen käyttäjien tarpeen sekä kilpailukyvyn markkinoilla minimoiden tilojen tyhjäkäyttöä, vanhenevista ja näistä aiheutuvaa ylimääräistä purkamista. Muuntojoustavuuden sekä rakennusosien suunnittelun uudelleenkäytettäväksi sekä tämän myötä tehokkaan purun avulla voidaan säästää syntyvää jätettä ja käyttää resursseja tehokkaasti. (SFS-EN ISO 20887:2020)

Saari & Heikkilä (2008) tutkimuksessaan jakavat rakennuksen muuntojoustavuuden kolmeen tyyppiin: palvelujoustavuus, muokattavuus sekä pitkäaikainen mukautuvuus. Eri

muuntojoustavuuden tyypit näyttäytyvät eri mittaisilla sykleillä ja niihin liittyvät vaatimukset muotoutuvat eri osapuolten kautta. Rakennuksen palvelujoustavuus näyttäytyy lyhyemmissä, noin 1–3 vuoden sykleissä ja siihen liittyvät vaatimukset asettavat pääosin rakennuksen ja tilojen käyttäjät. Palvelujoustavuus kuvaa kiinteistön kykyä mukautua kiinteistöön kohdistuvan käytön kuormituksen muutoksiin, esimerkiksi tilojen käyttäjämäärien muutoksiin. Palvelujoustavuuteen voidaan vaikuttaa pienten muutosten, kuten ilmanvaihdon säädön ja kevyiden väliseinien muutosten kautta. Muuntojoustavuuden tyypeistä muokattavuuteen liittyvät tarpeet näyttäytyvät erityisesti kiinteistön käyttäjien tai käyttöön liittyvien muutosten myötä esimerkiksi 3–10 vuoden välein. Kiinteistön muokattavuus kuvaa siis rakennuksen kykyä vastata käyttäjien muuttuviin tarpeisiin ja se on keskeistä erityisesti kiinteistön omistajalle. Pitkäaikainen mukautuvuus näyttäytyy rakennuksen kykyynä mukautua elinkaaren aikana esiintyviin tuntemattomiin toimintoihin ja tarpeisiin. Pitkäaikainen mukautuvuus on tärkeää kiinteistön omistajalle esimerkiksi myytäessä tai ostettaessa kiinteistöä, mutta se on myös erityisen tärkeä yhdyskuntarakenteen ja kulttuuriympäristön monimuotoisuuden ja kerrostuneisuuden ylläpitämisessä, sen mahdollistaessa vanhojen rakennusten käytön ja muokattavuuden rakennuksen varsinaisen elinkaaren päätyttyä. Mahdollisimman pitkäaikainen mukautuvuus mahdollistetaan universaalein suunnitteluratkaisuin. Keskeistä kaikkien muuntojoustavuuden tyyppien integroimisessa osaksi rakennusta on kaikkien kolmen tekijän huomioiminen jo suunnitteluvaiheessa. (Saari & Heikkilä 2008 ss. 239–240)

Muutokset voidaan suorittaa rakenteita muokkaamalla tai tilan varustelua kalustemuutoksien avulla. Muuntojoustavuus on yksi kestävän rakentamisen keskeisistä tekijöistä mahdollistaen rakennuksen mahdollisimman pitkän käyttöiän ja muokattavuuden tilojen käyttäjien tarpeisiin. Muuntojoustavuudella pyritään minimoimaan mahdollinen tilojen vajaakäyttö, mutta myös materiaalien sekä muiden resurssien kulutus. Tilojen muuntojoustavuus on myös keskeinen tekijä vuokralaisten vuokrausintressissä, jolloin vuokrattavat tilat täytyy olla vuokralaisten tarpeeseen sopivia. Tilojen monikäyttöisyys käsittää tilojen muuntautumiskyvyn suorittamatta rakenneteknisiä töitä, kun muunneltavuuteen sisältyy suurempia rakennusteknisiä töitä. Muunneltavuuden avulla pyritään vastaamaan suurempiin käyttötarpeen muutoksiin, kun tilojen rakennetta ja pohjaratkaisuja on tarve muuttaa. Keskeistä muunneltavien rakennusten suunnittelussa on rakennuksen kokonaisvaltainen suunnittelu tilojen, järjestelmien ja varusteiden sijoittelun ja niiden muutosten mahdollistamisen kautta. Rakenneteknisesti pitkät jännevälit ja pilarirakenteet edesauttavat muunneltavuuden mahdollistamista. Muuntojoustavuuden yksi alalaji on laajennettavuus, joka käsittää tilojen laajentamisen pysty- tai vaakasuunnassa. Tilojen muun-

tojustavuus mahdollistetaan jo rakennuksen suunnitteluvaiheessa, jolloin kantaville rakenteille, tilojen käyttötehokkuudelle, talotekniikan sijoittelulle ja rakennuksen asemoinnille asetetaan vaatimukset. (Häkkinen & Ala-Kotila 2019 s. 5; ss. 7–9; ss. 12–13)

Häkkinen & Ala-Kotila (2019 s. 16) pitävät muunneltavuuden suunnittelun suurimpana haasteena kiinteistökonsepteissa elinkaariajattelun puuttumista. Celluci & Sivo (2015) kuvaavat muuntojoustavuutta kykynä vastata tulevaisuuden epävarmuuksiin mahdollistamalla tilojen sopeutumisen muutoksiin. Vanhentuneilla rakennuksilla ei ole vahvaa kilpailuasemaa markkinoilla, jolloin suunnitteluvaiheen päätökset ja elinkaareen sekä sen joustavuuteen liittyvä konseptointi ovat keskeisiä tekijöitä pitkän ja tehokkaan elinkaaren mahdollistamiseksi erityisesti korjaushankkeissa (Celluci & Sivo 2015 ss. 845–846).

Purettavuuden edistäessä rakenneosien ja materiaalien kierrätystä, korjaamista sekä uudelleenkäyttöä, toimii se keskeisenä menetelmänä myös rakentamisen kasvihuonepäästöjen vähentämisessä (ISO 29887:2020; Häkkinen & Ala-Kotila 2019 s. 16). Muuntojoustavuus on yksi tärkeä tekijä myös energiatehokkuutta parantavissa toimenpiteissä, jolloin pienillä rakenneteknisillä muutoksilla voi olla suurikin merkitys toimenpiteiden onnistumisessa. Tilojen ja rakenteiden muunneltavuus mahdollistaa esimerkiksi energiankäytön optimoinnin ja parantamisen tilojen käyttöiän varrella. Ympäristöhyödyt syntyvät muuntojoustavuuden mahdollistaen materiaaleista sekä rakennusaineiden käytön säästön sekä käytönaikaisen energia- ja materiaaliresurssien käytön pienentymisen minimoiden samalla näistä aiheutuvia päästöjä. Tilatehokkuuden kasvaessa vähenee tarve käyttää tiloja muualla. Muunneltavuus mahdollistaa tilojen ja materiaalien tehokkaampaa käyttöä elinkaaren aikana sekä lisää rakennuksen käyttöikä. Saavutetut ympäristöhyödyt ja niiden laajuus riippuvat suunnittelun ja toteutuksen onnistumisen lisäksi markkinoilla olevien kiertotalouden liiketoimintamalleista, joilla mahdollistetaan materiaalien ja tuotteiden uusiokäyttö, korjaaminen, käyttö sekä kierrätys. Rakennuksen suunnittelun, toteutuksen sekä korjausten ja ylläpidon dokumentointi edesauttaa kohteen ylläpitoa, korjauksia, kierrätettävyyttä sekä purettavuutta. (Häkkinen & Ala-Kotila 2019 s. 25)

Häkkinen & Ala-Kotila (2019) kuvaavat muuntojoustavuuden mahdollistavan monikäyttöisyyden pienentävän ympäristövaikutuksia, jos tilojen monikäyttöisyydellä parannetaan olemassa olevan rakennuksen käyttöastetta samalla vähentäen rakentamisen tarvetta muualla samalla vähentäen liikkumistarpeita ja niistä aiheutuvia liikenteen päästöjä. Laskennallisesti ympäristövaikutusten arviointi ei anna suoraa tulosta, sillä usein tilojen monikäyttöisyys ja tilatehokkuuden kasvattaminen voi nostaa talotekniikan käytön lisääntyttyä kohteen energiankulutusta. Laskennallisesti tilojen monikäyttöisyyden sekä muuntojoustavuuden tuomaa ympäristövaikutusta esimerkiksi päästövähennysten

kautta on hankala todentaa vertailtavuuden sekä riittävän täsmällisten skenaarioiden luomiseksi. (Häkkinen & Ala-Kotila 2019 s. 26)

Tutkimuksessaan Häkkinen & Ala-Kotila (2019) arvioivat toimitilan 50 vuoden elinkaaren aikaisiksi CO₂ päästöiksi 960 kgCO_{2e}/m², jonka suuruinen päästösäästö voidaan saavuttaa tilojen monikäyttöisyyden aikaansaama tilantarpeen poistuma muualta. Tutkimuksessa arvioitiin yksinkertaistetusti ja karkeasti toimistotilan tilatehokkuuden kasvattamisen vaikutusta kohteen hiilidioksidipäästöihin elinkaaren aikana. Tarkastellun kohteen pinta-ala on 7900 m² ja arvioitu työntekijämäärä 460 henkilöä. Tilatehokkuuden parantamisella 25 m²/henkilö noin 17 m²/henkilö saavutettiin laskennallisesti 3,2 miljoonan kilogramman päästövähennys toimistorakennuksen 50 vuoden elinkaaren tarkastelujaksolla. Tarkasteltua päästövähennystä on hankala todentaa syntyvän tilojen monikäyttöisyydestä ja muunneltavuudesta, mutta päästövähennyksiä voidaan ajatella syntyvän ainakin epäsuorasti monikäyttöisyyden ja joustavuuden synnyttämistä monitilakäytön ja etätyöskentelyn aikaansaamat liikkuvuuden ja tilatarpeen vähenemän. Koulurakennukselle suoritettussa tarkastelussa arvioitiin tilojen iltakäytöllä mahdollistetun monikäyttöisyyden vaikutusta. Tilojen ilta-aikaan tapahtuva harrastuskäyttö lisäsi vuosittaisia käyttäjätunteja 15 %. Tilojen suunnittelun monikäyttöisiksi arvioitiin kasvattavan elinkaaren kasvihuonekaasupäästöjä 2%, mutta käyttäjätunneille jyvitettyssä päästöissä monikäyttöisyyden tuoma käyttötuntien kasvu tuo noin 10 % säästön elinkaaripäästöissä. (Häkkinen & Ala-Kotila 2019 ss. 26–27)

Muunneltavuus, purettavuus sekä monikäyttöisyys toimivat keskeisinä tekijöinä rakentamisen kasvihuonepäästöjen vähentämisessä. Muunneltavuuden vaatiminen uudis- sekä peruskorjauskohteilta vähentää tulevaisuudessa uuden rakentamista, kun muuntojoustavuuden avulla voidaan vastata muuttuneisiin tilatarpeisiin. Käyttöasteen lisääminen mahdollistetaan monikäyttöisyyden kasvattamisella yhteiskäyttötilojen ja teknologian tuomien mahdollisuuksien integroimisella osaksi tilojen käyttöä. (Häkkinen et al. 2019 s. 51). Esimerkiksi etätyön yleistyminen sekä yhteiskäyttöisten ja joustavien toimitilojen ja etätyöpisteiden, kuten esimerkiksi YIT:n Workery+ -konseptin (yit.fi 2021), yleistyminen ja kehittyminen mahdollistaa tilojen tehokkaampaa käyttöä.

4. UUDIS- JA KORJAUSRAKENTAMISEN ELINKAARIPÄÄSTÖJEN MALLINTAMINEN

Työn empiirisen osuuden elinkaaren aikainen päästölaskenta tullaan suorittamaan alustavan laskennan menetelmällä One Click LCA -ohjelmalla vertailemalla tarkasteltavan kohteen peruskorjauksen elinkaaren päästövaikutusta verrattuna kohteen purkavan uudisrakentamisen elinkaaren päästövaikutukseen. One Click LCA -ohjelma on kehitetty automatisoimaan tarkasteltavien rakennusten ja materiaalien elinkaaren päästövaikutuksia ja se toimii kohdeyrityksessä hankkeiden elinkaariarvioinnin työkaluna.

4.1 Elinkaaripäästöjen mallintaminen One Click LCA-ohjelmalla

Rakennushankkeen ja yksittäisten materiaalien elinkaaren ympäristövaikutusten arviointiin on käytetty aikaisemmin taulukkolaskentatyökalua sekä yksinkertaisia ohjelmia. One Click LCA Ltd (ent. Bionova Ltd) on kehittänyt One Click LCA -ohjelman automatisoimaan rakennusten, materiaalien sekä erilaisten hankkeiden elinkaariarviointia. One Click LCA -ohjelma on maailmanlaajuisesti yleisesti käytetty rakentajien, sijoittajien, suunnittelijoiden sekä materiaalivalmistajien keskuudessa ja sitä käytetään tämän työn empiirisen tutkimuksen laskentatyökaluna. One Click LCA -ohjelmaa voi hyödyntää rakennus- ja infrastruktuurihankkeiden elinkaariarviointiin sekä hankeratkaisujen vertailuun ja optimointiin päätöksenteon tukena. Ohjelmaa voidaan hyödyntää myös materiaalien elinkaariarviointiin sekä standardien mukaisten ympäristöselosteiden laatimiseen. Organisaatiot voivat hyödyntää ohjelmaa omien hankkeiden elinkaarivaikutusten sekä päästöjen analysointiin, vertailuun sekä raportointiin. (One Click LCA Ltd 2021)

One Click LCA:n elinkaaren arviointityökalun avulla voidaan rakennuksen koko elinkaaren aikainen hiilijalanjälki mallintaa ohjelmalla, sen soveltaessa laskentaan ajankohtaista päästötietokantaa sekä sertifikaattien asettamia vaatimuksia. Ohjelman sisältämä päästötietokanta sisältää EPD tietokantoja, joiden pohjalta on luotu rakennustuotteiden ja materiaalien valmistajakohtaisista sekä maakohtaisista keskimääräisistä päästötiedoista koostuva laskennassa hyödynnettävä tietokanta. Laskenta suoritetaan valitun laskentamenetelmän tai sertifikaatin avulla, jonka pohjalta ohjelma tunnistaa menetelmän tai sertifikaatin asettamat vaatimukset, elinkaaren vaiheet, indikaattorit sekä vertailuanalyysit. Ohjelmaan on integroitu yli 40 kappaletta sertifikaatteja ja laskentamenetelmiä, joista tässä työssä käytetään aikaisemmin mainittua Level(s) -arviointimenetelmää. (One Click LCA Ltd 2021)

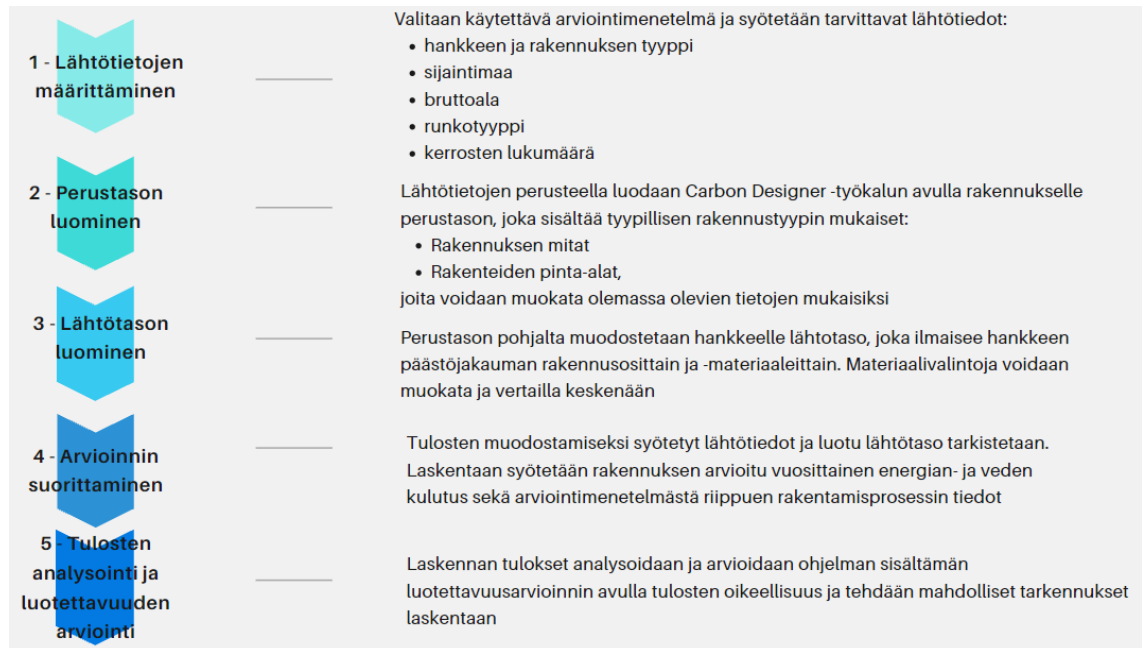
Rakennushanketta mallinnettaessa, laskenta voidaan suorittaa hankkeen hyvin varhaisessa vaiheessa, jolloin hankkeesta tarvittavat lähtötiedot ovat vähintään hankkeen sekä rakennuksen tyyppi, sijaintimaa, kokonaisala, runkotyyppi sekä kerrosten lukumäärä. One Click LCA -ohjelmassa olevan Carbon Designer -työkalun avulla ohjelma luo annettujen parametrien avulla rakennukselle perustason laskemalla annettujen pinta-alan sekä kerrosmäärän avulla tyypilliselle rakennustyyppille ominaiset rakennuksen mitat sekä rakenteiden pinta-alat. Ohjelma muodostaa pinta-alojen sekä valitun laskentajakson pohjalta hankkeen päästöjakauman lähtötason rakennusosittain sekä materiaaleittain.

Lähtötason muodostuksen jälkeen, ohjelmassa voidaan muokata valittuja materiaaleja ja niiden määriä sekä niiden suhteita toisiinsa. Ohjelma muodostaa automaattisesti vertailun tehtyjen muutosten sekä lähtötason välillä, jolloin saatuja tuloksia voidaan käyttää päätöksenteon tukena. Lopullisen elinkaaren aikaisen hiilijalanjäljen arvioinnin suorittamiseksi ohjelmaan on syötettävä lähtötason luomiseen tarvittavien tietojen sekä rakennusmateriaalien ja niiden määrien lisäksi arvioitu vuotuinen energiankulutuksen määrä. Kohteen energiankulutus voidaan muodostaa lämmitetyn bruttopinta-alan avulla syöttäen ohjelmaan arvioidut energiankulutuksen parametrit, kuten verkkosähkön kulutus, kaukolämmön ja -kylmän kulutus tai ulkopuolelle toimitettu energia.

Riippuen käytetystä laskentamenetelmästä, laskennassa laskentatyökaluun on myös määritettävä rakentamisprosessin sekä veden kulutuksen arviot. Käytettäessä Ympäristöministeriön arviointimenetelmää laskentaohjelma käyttää automaattisesti taulukkoarvoja rakentamiselle sekä veden käyttöä ei arvioida menetelmässä lainkaan. Rakentamisen aikaiset vaikutukset Ympäristöministeriön menetelmä arvioi suoraan taulukkoarvoista. Level(s)-menetelmää käytettäessä sekä rakentamisprosessin tiedot että käyttöveden kulutus on syötettävä laskentaohjelmaan manuaalisesti. Rakentamisprosessia arvioitaessa voidaan laskentaohjelmaan syöttää joko rakennuksen pinta-ala ja ilmasto-tyyppi, joiden perusteella ohjelma laskee päästöt tai ohjelmaan voidaan syöttää rakentamisen aikaiset energian, veden, materiaalien ja polttoaineiden kulutukset ja jätteiden synnyn määrät manuaalisesti.

Syötettyjen tietojen perusteella ohjelma antaa tuloksena tarkastellun kohteen elinkaaren aikaisen hiilijalanjäljen. Laskennan tuloksista saadaan kattavasti tietoa hankkeen kokonaisilmastopäästöistä (yks. CO₂e tai kgCO₂e), kokonaispäästöistä jyvitettyinä laskentajakson ja pinta-alan mukaan (yks. CO₂e/m²/vuosi), sekä arvioiduista hiilen sosiaalisista kustannuksista. Tarkasteltavan rakennuksen vähähiilisyden arvioinnin tulokset on esitetty ohjelmassa visuaalisesti sekä ryhmiteltynä eri perustein esimerkiksi rakennushankkeen elinkaaren vaiheittain (kuva 1), pääluokittain sekä resurssityypeittäin.

Tuloksista voidaan rakennuksen elinkaaren päästöihin merkittävimmin vaikuttavimmat materiaalit, joille ohjelma tarjoaa ympäristöystävällisempiä vaihtoehtoja päätöksenteon tueksi. Ohjelma suorittaa myös automaatti LCA Checker:in avulla kattavuuden ja luotettavuuden arvioinnin tarkastelemalla syötettyjen elementtien laajuutta sekä mahdollisia puutteita sekä verraten saatuja tuloksia samantyyppisiin projekteihin, jonka perusteella ohjelma antaa vertailuarvon kohteen CO₂-päästöille.



Kuva 8. Rakennushankkeen elinkaaren hiilijalanjäljen arvioinnin prosessi One Click LCA -ohjelmassa (One Click LCA Ltd 2021)

Hankkeen suunnittelun edetessä ja suunnitelmien tarkentuessa, voidaan arviointi suorittaa kattavammin. Laskentaa voidaan suorittaa esimerkiksi tuomalla tietomalli ohjelmaan, jonka pohjalta ohjelma pyrkii tunnistamaan dataa ja erittelee tunnistetun ja tunnistamattoman datan, jonka jälkeen tunnistamaton data voidaan manuaalisesti käydä läpi. Tarkkaa laskentaa voidaan suorittaa siinä vaiheessa, kun hankkeen todelliset suunnitteluratkaisut ja materiaalmäärät ovat tiedossa. One Click LCA -ohjelmaan voidaan syöttää materiaalien tyypit ja määrät manuaalisesti tai ohjelmaan voidaan viedä esimerkiksi Excel-tiedoston avulla.

4.2 Olemassa olevan rakennuksen sekä laskennassa mallinnettävien skenaarioiden kuvaus

Laskennassa simuloitava kohde on pääkaupunkiseudulla sijaitseva 1980-luvulla käytöön otettu toimistorakennus. Rakennus on osa laajempaa korttelia, mutta laskennan yksinkertaistamiseksi on tarkasteltavaksi kohteeksi rajattu korttelin yksi rakennus. Rakennus on suojelematon ja se on sijoitettu ajantasa-asemakaavassa toimitilarakennusten

korttelialueelle. Kohde valittiin tarkasteluun sen ollessa osa suurempaa kehitettävää korttelihanketta ja kohteen suunnittelu on osittain edennyt laskentaa varten riittävälle tasolle. Kohteen peruskorjauksesta on tehty päätös ja sen korjaus- ja muutostoimenpiteille on tehty hankekuvaus, rakennustapaselostus sekä korjaustoimenpiteiden yhteydessä uusittavista rakenteista on saatavilla rakennepiirustukset. Saatavilla olevat suunnitteluasiakirjat toimivat laskentaan mallinnettavien kohteiden keskeisimpinä lähtötietoina.



Kuva 9. Laskennassa simuloitavan rakennuksen julkisivu pääsisäänkäynnillä

Kohteen korjaamisesta sekä purkavasta uudelleenrakentamisesta tullaan muodostamaan kummastakin neljä skenaariota, jolloin yhteensä laskentaan simuloitavia skenaarioita on kahdeksan. Laskentaohjelmaan eri skenaarioihin simuloitavat rakennukset ovat pääpiirteiltään samanlaisia, kun rakennuksien ulkomuodot, runko- sekä sisäpuolen ratkaisut ovat kaikissa skenaarioissa toisiaan vastaavia. Eri skenaarioissa vaihtuvat joko kohteen lämmitysmuoto tai uusiutuvan energian (aurinkolämpö) hyödyntäminen. Uudisrakentamisen skenaarioissa tarkasteltavat rakennukset simuloidaan vastaamaan pääpiirteiltään olemassa olevaa rakennusta huomioiden korjaustoimenpiteiden yhteydessä tehtävät muutokset. Uudisrakentamisen skenaarioiden sisäpuolen ratkaisut vastaavat olemassa olevan rakennuksen sisätiloja korjaustoimenpiteiden jälkeen. Toimistotilat on toteutettu avoimena sekä helposti muunneltavana ratkaisuna kevyin kipsi- ja lasiväliseiniin. Verrattuna olemassa olevaan rakennukseen uudisrakentamisen skenaarioissa ulkoseinien eristepaksuutta on kasvatettu. Julkisivun ratkaisut, ikkunoiden pinta-ala sekä runkorakenteet vastaavat korjausrakentamisen skenaarioita. Laskennassa sekä eri skenaarioiden mallintamisessa tehdyt rajaukset ja oletukset on esitetty tarkemmin kappaleessa 4.4.

Ensimmäisenä skenaariona tarkastellaan purkavaa uudisrakentamista, joka on liitetty kaukolämpöverkkoon (skenaario 1A). Laskennassa tarkasteltaviin purkavan uudisraken-

tamisen skenaarioihin viitataan numerolla 1 ja korjausrakentamisen skenaarioihin numerolla 2. Skenaarioiden eri toteutuksiin viitataan kirjaimilla A-D. Uudisrakennuksen sisäpuolen ratkaisut vastaavat korjaustoimenpiteiden yhteydessä toteutettuja ratkaisuja ja materiaalivalinnat ovat identtisiä korjauskohteiden kanssa. Energiankulutuksen taso on uudisrakennusten skenaarioissa korjausrakentamista alhaisempi. Toisena skenaarioina tarkastellaan purkavaa uudisrakentamista, joka on liitetty maalämpöverkkoon. Kolmannessa skenaarioissa tarkastellaan purkavaa uudisrakentamista, jossa hyödynnetään aurinkopaneelijärjestelmän tuottamaa sähköä. Neljäs skenaario tarkastelee purkavan uudisrakentamisen elinkaaren aikaisia päästöjä, jos kohde liitetään maalämpöön sekä kohteeseen asennetaan aurinkopaneelijärjestelmä.

Viidennessä skenaariossa tarkastellaan olemassa olevan rakennuksen korjaamista suunniteltujen ja toimeenpantavien korjaustoimenpiteiden perusteella. Kuudentena skenaarioina tullaan tarkastelemaan maalämpöverkoston liitettävää korjattavaa rakennusta. Seitsemäntenä skenaarioina tarkastellaan kohteeseen lisättävien aurinkopaneelien vaikutusta kohteen elinkaaren päästövaikutuksiin korjausrakentamisessa ja kahdeksantena skenaarioina tarkastellaan korjausrakennuksen päästövaikutusta, jos kohteessa on sekä maalämpö että aurinkosähkö käytössä.

Taulukko 4. Laskennassa simuloitavien skenaarioiden perustiedot

	Rakennetekniset ratkaisut ja materiaalivalinnat	Lämmitys- muoto	Energiankulutuksen taso
Skenaario 1A: <i>Tavallinen purkava uudisrakentaminen</i>	Olemassa olevan rakennuksen sekä korjaustoimenpiteiden mukaan mallinnettu rakennus, tyypilliset nykyaikaiset rakenteet ja materiaalit	Kaukolämpö	Energiatehokkuuden taso täyttää uudisrakennuksen E-luvun vaatimusarvon
Skenaario 1B: <i>Purkava uudisrakentaminen, liittäminen maalämpöön</i>		Maalämpö	Maalämmön vaikutus energiankulutukseen huomioitu
Skenaario 1C: <i>Purkava uudisrakentaminen, aurinkosähköjärjestelmä</i>		Kaukolämpö	Aurinkosähkön tuoton osuus huomioitu sähkönkulutuksessa
Skenaario 1D: <i>Purkava uudisrakentaminen, liittäminen maalämpöön sekä aurinkosähköjärjestelmä</i>		Maalämpö	Maalämmön sekä aurinkosähkön vaikutus energiankulutukseen huomioitu
Skenaario 2A: <i>Tavallinen korjausrakentaminen</i>	Olemassa olevat, hyödynnettävät rakenteet sekä korjaustoimenpiteiden yhteydessä uusittavat rakenteet ja materiaalit	Kaukolämpö	Olemassa olevan rakennuksen energiankulutuksen taso korjaustoimenpiteiden yhteydessä energiatehokkuutta parantavien toimenpiteiden vaikutus huomioituna

Skenaario 2B: <i>Korjausrakentaminen, liittämisen maalämpöön</i>		Maalämpö	Maalämmön vaikutus energiankulutukseen huomioitu
Skenaario 2C: <i>Korjausrakentaminen, aurinkosähköjärjestelmä</i>		Kaukolämpö	Aurinkosähkön tuoton osuus huomioitu sähkökulutuksessa
Skenaario 2D: <i>Korjausrakentaminen, liittämisen maalämpöön sekä aurinkosähköjärjestelmä</i>		Maalämpö	Maalämmön sekä aurinkosähkön vaikutus energiankulutukseen huomioitu

Olemassa oleva rakennus toimii eri skenaarioissa mallinnettavien kohteiden pohjana niiltä osilta kuin mallinnettavat skenaariot vastaavat toisiaan. Eri skenaarioiden yhteiset rakennetekniset lähtötiedot sekä skenaario kohtaiset energiankulutukset on esitetty taulukossa 5. Eri skenaarioiden pohjana toimivassa rakennuksessa on seitsemän maanpäällistä kerrosta ja kaksi kellarikerrosta, joissa sijaitsee maanalainen parkkihalli. Parkkitiloja sijaitsee myös ensimmäisessä kerroksessa, mutta laskennan yksinkertaistamiseksi pysäköintitilat jätetään kokonaan huomioimatta. Rakennuksen kokonaisbruttuala ilman pysäköintitiloja on 13 888 br^m². Kerrosala per kerros on hieman yli 2 000 m². Olemassa olevan rakennuksen korjausasteen on arvioitu olevan 45 %. Kohteen korjaustoimenpiteet kuvataan tässä kappaleessa korjausten laajuuden sekä eri skenaarioiden simuloitavien ratkaisujen hahmottamiseksi.

Kohteen peruskorjauksen yhteydessä rakennuksen ensimmäisen kerroksen ravintolatiloihin tehdään muutoksia, kun ravintola ja sen keittiö siirretään kerroksen sisäisesti samalla laajentaen ravintolan tiloja. Kerroksien kahdesta kuuteen toimitilat saneerataan ja seitsemännen kerroksen edustustilat jätetään ennalleen pois lukien pienet pintojen huoltokäsittelyt. Kohteen ulkoseinät ovat pääosin pesubetonipintaisia tai tiililaattapintaisia sandwich-elementtejä, ja rakennuksen välipohjat sekä yläpohja ovat ontelolaattarakenteisia. Skenaarioissa yksi ja kaksi sekä neljä, kiinteistö on liitetty paikalliseen kaukolämpöjärjestelmään. Skenaariossa kolme ja viisi lämmitysmuotona toimii maalämpö. Kaikissa skenaarioissa kiinteistö on liitetty kunnalliseen vesi- ja viemäriverkostoon.

Eri skenaarioihin mallinnettavassa rakennuksessa on sokkeli- ja anturaperustus. Korjaustoimenpiteiden yhteydessä perustuksiin sekä ulkoseiniin on kohdistettu korjaustoimenpiteitä rapautumisen vuoksi. Korjaustoimenpiteiden yhteydessä rakennuksen julkisivu verhoillaan metalliverhouksella. Ikkunoiden jakoa muutetaan osittaisten ikkuna-aukkojen laajentamisen myötä sekä kohteen kaikki ikkunat uusitaan. Toisen kerroksen ikkunoiden yläpuolelle asennetaan aurinkosuojalippa.

Taulukko 5. Tarkasteltavien skenaarioiden yhteiset rakennetekniset ja laskennalliset lähtötiedot

Rakennuksen tyyppi		Toimistorakennus
Bruttoala		13 888 brm ²
Lämmitetty nettoala		13 114 m ²
Arvioitu rakennustilavuus		47 120 rak-m ³
Maanpäällisten kerrosten lukumäärä		7 kerrosta
Rappujen lukumäärä		3 rappua
Runkotyyppi		Betonirunko
Perustusten tyyppi		Sokkeli- ja anturaperustus
Välipohjien ja yläpohjan tyyppi		Ontelolaatta
Kantavat väliseinät		Betoniseinä
Julkisivurakenne		Sandwich-elementti
Laskentajakso		50 vuotta
Energiankulutus	Uudisrakentaminen	Korjausrakentaminen
Energiankulutus, kaukolämpö	<i>Skenaario 1A:</i> <ul style="list-style-type: none"> • Verkkosähkö: 675 878 kWh/vuosi • Kaukolämpö: 431 633 kWh/vuosi • Kaukokylmä: 110 778 kWh/vuosi • Arvioitu E-luku: B (82 kWh/m²vuosi) 	<i>Skenaario 2A:</i> <ul style="list-style-type: none"> • Verkkosähkö: 736 145 kWh/vuosi • Kaukolämpö: 778 680 kWh/vuosi • Kaukokylmä: 110 778 kWh/vuosi • Arvioitu E-luku: B (100 kWh/m²vuosi)
Energiankulutus, maalämpö	<i>Skenaario 1B:</i> <ul style="list-style-type: none"> • Verkkosähkö: 819 756 kWh/vuosi • Kaukolämpö: 0 kWh/vuosi • Kaukokylmä: 0 kWh/vuosi • Arvioitu E-luku: A (75 kWh/m²vuosi) 	<i>Skenaario 2B:</i> <ul style="list-style-type: none"> • Verkkosähkö: 995 705 kWh/vuosi • Kaukolämpö- ja kylmä: 0 kWh/vuosi • Arvioitu E-luku: B (92 kWh/m²vuosi)
Energiankulutus, aurinkosähkö	<i>Skenaario 1C:</i> <ul style="list-style-type: none"> • Verkkosähkö: 631 253 kWh/vuosi • Kaukolämpö: 431 633 kWh/vuosi • Kaukokylmä: 110 778 kWh/vuosi • Arvioitu E-luku: A (78 kWh/m²vuosi) 	<i>Skenaario 2C:</i> <ul style="list-style-type: none"> • Verkkosähkö: 691 520 kWh/vuosi • Kaukolämpö: 778 680 kWh/vuosi • Kaukokylmä: 110 779 kWh/vuosi • Arvioitu E-luku: B (93 kWh/m²vuosi)

Energiankulutus, maalämpö ja aurinkosähkö	Skenaario 1D: <ul style="list-style-type: none"> • Verkkosähkö: 775 131 kWh/vuosi • Kaukolämpö: 0 kWh/vuosi • Kaukokylmä: 0 kWh/vuosi • Arvioitu E-luku: A (71 kWh/m²vuosi) 	Skenaario 2D: <ul style="list-style-type: none"> • Verkkosähkö: 951 080 kWh/vuosi • Kaukolämpö- ja kylmä: 0 kWh/vuosi • Arvioitu E-luku: B (88 kWh/m²vuosi)
Käyttövedenkulutus (Kaikki skenaariot)	2 544 m ³ /vuosi	2 544 m ³ /vuosi

Korjaustoimenpiteiden yhteydessä olemassa olevan rakennuksen 2.–6. kerroksen toimistotilojen väliseinät puretaan muuttaen tilat avoimeksi monitilatoimistoksi. Tiloihin asennetaan tilanjakajiksi 2-kertaisia levyseiniä sekä lasiväliseiniä huomioiden esimerkiksi hiljaisen työskentelyn tilojen sekä neuvotteluhuoneiden ääneneristysvaatimukset. Myös pääosa kohteen sisä- ja ulko-ovista uusitaan. Korjaustoimenpiteiden yhteydessä rakennuksen sisätilojen pintarakenteet uusitaan sekä tilojen kalusteet ja varusteet sekä kulunvalvonta- ja tietoliikennelaitteistot uusitaan. Kohteen kolme hissiä uusitaan.

Taloteknisten korjaustoimenpiteiden yhteydessä rakennuksen kaukolämmityksen alakeskus uusitaan, mutta muut lämmitysjärjestelmän osat pyritään pitämään ennallaan. Skenaarioissa, joissa tarkastellaan maalämpöä, kaukolämmitykseen liittyvät järjestelmät korvataan maalämpöön liitettävillä järjestelmillä. Kohteen vesi- ja viemärijärjestelmät pysyvät pääosin ennallaan, tilamuutoksista johtuvat viemäroinnit liitetään nykyisiin. Kattosadevesiviemärit eristetään koko matkalta ja järjestelmä uusitaan tarvittaessa. Kohteen käyttövesijohdot uusitaan sekä kylmävesijohtojen eristetään kondenssitiiviisti. Kohteen ilmanvaihtokoneet uusitaan ja ne varustetaan lämmöntalteenottolaitteistolla (LTO-laitteisto).

Korjaustoimenpiteiden talotekniikan järjestelmäkuvauksessa toimisto-osien sisäilman tavoitetaso on ilmoitettu olevan luokkaa S2 ja muissa tiloissa S3. Ilmanvaihdon on kerrottu toteutettavan ympäristöministeriön asetuksen (1009/2017) uuden rakennuksen sisäilmastosta ja ilmanvaihdosta mukaisesti. Korjaustoimenpiteiden yhteydessä ilmanvaihtokoneiden säätö- ja valvonta automatisoidaan. Kohde liitetään peruskorjauksen yhteydessä kaukokylmäverkkoon. Ensimmäisessä kerroksessa sijaitsevien ravintolasalin ja keittiön jäähdytys toteutetaan jäähdytyspaneelin tai puhallinkonvektorein. Kohteen palontorjuntajärjestelmä säilytetään ennallaan. Kohteen sähköenergian asennus- ja apujärjestelmät uusitaan tarvittavin osin. Pääjakelujärjestelmät säilytetään ennallaan. Valaistus toteutetaan LED-valaisimin. Rakennuksen automaatio- ja mittausjärjestelmä uusitaan.

Kaikissa skenaarioissa materiaalivalinnat sekä kohteen laajuus pidetään samana. Tarkempi laskennan suorittaminen kuvattu seuraavassa kappaleessa 4.3. Eri skenaarioiden rakennetekniset ratkaisut mallinnettiin laskentaan olemassa olevan rakennuksen säilytettävien rakennusosien ja materiaalien sekä uusittavien rakenteiden ja materiaalien pohjalta hyödyntäen olemassa olevan rakennuksen vanhoja suunnitelmia, korjaustöiden suunnitelmia ja määräluetteloja sekä materiaali- ja laitevalmistajilta löydettäviä lähtö- ja käyttötietoja.

4.3 Laskennan suorittaminen

Laskenta aloitettiin luomalla One Click LCA -ohjelmaan uusi projekti hankkeelle ja määrittämällä projektiin koskevat lähtötiedot. Projektiin määritettiin rakennuksen tyyppi, bruttoala, rakennuksen maanpäällisten kerrosten lukumäärä sekä runkotyyppi taulukossa 5 esitettyjen lähtötietojen mukaan. Laskennassa oli tavoitteena soveltaa kappaleessa 2.4 esiteltyä vuonna 2019 testikäyttöön Ympäristöministeriön rakennuksen vähähiilisyiden arviointimenetelmää. Laskennan edetessä huomattiin, ettei laskentaohjelma arvioinut korjausrakentamisen ympäristövaikutuksia toivotulla tavalla sen laskiessa esimerkiksi säilytettävien rakenteiden kuljetukset työmaalle, vaikka näitä ei laskennassa tulisi huomioida. One Click Ltd:n suosituksesta laskentamenetelmäksi valittiin laskentatyökalussa kappaleessa 2.3 esitelty EU:n komission Level(s)-menetelmä, johon Ympäristöministeriön arviointimenetelmä myös pohjautuu.

Suunnitelman luomisen yhteydessä määritetään laskentaohjelmaan analyysin laajuus ja tyyppi. Vaikka laskennan toisena skenaariona on peruskorjaus, valittiin One Click LCA -ohjelmassa hankkeen tyyppiä uudisrakennus One Click Ltd:n ohjeistuksen mukaisesti sekä tulosten vertailtavuuden varmistamiseksi. Hankkeen tyyppin valinta vaikuttaa One Click Ltd:n mukaan ensisijaisesti ainoastaan laadunvarmistustyökalun antamiin tuloksiin, jolloin hanketyypin valinnalla ei pitäisi olla vaikutusta tuloksiin. Analyysiin sisällytettiin kaikki rakennusosat (perustukset, runko ja ulkovaippa, pintamateriaalit ja talotekniikka) pois lukien ulkoalueet.

Laskenta suoritettiin ensin mallintamalla olemassa oleva rakennus sisältäen korjaustöiden yhteydessä tehtävät muutokset. Laskenta aloitettiin luomalla kohteen perustaso One Click LCA:n Carbon Designer -työkalulla. Carbon Designer -työkalun avulla saatuja ohjelman oletettavia mittoja ja pinta-aloja muokattiin saatavilla olevien lähtötietojen avulla vastaamaan olemassa olevan rakennuksen todellisia tai oletettuja mittoja.

Elinkaaripäästöjen lähtötason luomisen jälkeen ohjelman automaattisesti mallinnetut materiaalit ja niiden määrät ja suhteet toisiinsa käytiin manuaalisesti läpi. Rakennusmateriaalien ja niiden määrien mallinnuksen tukena käytettiin kohteen korjaustoimenpiteiden määräluettelo, rakennustapaselostusta, pohjapiirustuksia sekä tehtyjä oletuksia One Click LCA -ohjelman antamien parametrien pohjalta. Kohteen lähtötietojen sekä tehtyjen oletusten ohjelmaan mallinnettavat rakennusosat ja materiaalit tarkastettiin, valittiin oikeat materiaalit sekä arvioitiin materiaalien osuudet rakennusosissa. Ohjelma sallii myös joidenkin rakennetyyppien sisältämien materiaalien sekä materiaalipaksuuksien muokkaamisen.

Ohjelma jakaa syötetyt materiaalit ja niiden määrät sekä esittää muodostuneet päästöt jakautuneena kuuteen pääluokkaan, jotka määräytyvät ohjelman tekemien oletuksien sekä ohjelman käyttäjän mukaan. Ohjelman pääluokat ovat 1. Perustukset ja maanalaiset rakenteet, 2. Pystyrakenteet ja julkisivu, 3. Vaakarakenteet (pohjat, katot ja palkit), 4. Muut rakenteet ja materiaalit (ikkunat, ovet ja pintamateriaalit ym.) 5. Alue- ja piharakentaminen, 6. Rakennuksen talotekniikka. Eri pääluokat sekä niiden sisältämät rakenneosat ja materiaalit käytiin manuaalisesti läpi laskennan seuraavassa vaiheessa, jolloin ohjelmaan määriteltiin tarkemmin eri pääluokkien sisältämät materiaalit. Eri pääluokkien alle mallinnettiin sekä nykyiset olemassa olevat materiaalit että korjaustoimenpiteiden yhteydessä vaihdettavat materiaalit.

Korjausrakentamisen laskennan sekä laskentatyökalun ollessa vielä kehitysvaiheessa, ei One Click LCA:sta löydetty suoraa tietoa korjausrakentamisen laskennasta. Laskentaan pyydettiin apua One Click LCA:n tuesta koskien sekä rakennuksen muodon mallintamista, että korjausrakentamisen laskentaa. Korjauskohteen laskenta suositeltiin suoritettavan uudiskohteen tavoin, jolloin ero uudiskohteeseen muodostetaan lähtötason luomisen jälkeen. Tässä laskennan vaiheessa voidaan myös määrittää materiaalien työmaalla syntyvän hukan määrä sekä tieto siitä, että onko materiaali kierrätetty. Laskentaohjelmassa Ympäristöministeriön arviointimenetelmää käytettäessä, laskentaohjelma ei mahdollista erikseen materiaalikohtaisten kuljetusmatkojen muokkausta manuaalisesti, vaan hyödyntää Ympäristöministeriön valmiiksi antamia taulukkoarvoja. Level(s)-menetelmä mahdollistaa yksittäisten materiaalien kuljetusmatkojen muokkausta, jonka seurauksena laskentamenetelmänä päädyttiin käyttämään Ympäristöministeriön menetelmän sijasta Level(s)-menetelmää.

Ympäristöministeriön (2019a) sekä Euroopan Komission Level(s)-menetelmän periaatteiden mukaan korjaushankkeen elinkaariarvioinnissa, elinkaariarviointi rajataan koskemaan elinkaaren vaiheita korjaushetkestä eteenpäin eikä ennen korjausta kuluneita elin-

kaaren vaiheita huomioida. Arvioinnissa huomioidaan tällöin ainoastaan korjauksiin tarvittavat uudet tai osittain korjattavat rakennustuotteet ja -osat. Kuljetusten (A4, B3-4 ja C2) osalta huomioidaan korjaushankkeiden arvioinnissa korjauksista aiheutuvat rakennustuotteiden, materiaalien sekä mahdollisten maamassojen kuljetukset korjaustyömaalle. Arvioinnissa huomioidaan myös korjauksista sekä vanhojen rakenteiden ja materiaalien purkamisesta syntyvien jätteiden kuljetukset korjaustyömaalta jätteenkäsittelyyn tai välivarastointiin. Korjaushankkeen elinkaariarviointiin huomioidaan laajamittaisen korjauksen jälkeisen elinkaaren aikaisten korjausten ja vaihtojen kuljetusten hiilijalanjälki. Korjaushohteen elinkaaren lopun kuljetukset huomioidaan uudiskohteen tavoin. Korjauskohteen työmaan (A5) hiilijalanjälki lasketaan uudiskohteen tapaan työmaalla kuluvan ostoenergian ja polttoaineiden perusteella sekä huomioiden väliaikaisten työmaatilat tai -toiminnot sisällyttäen myös laajan korjaushankkeen jälkeiset korjaus- ja purkutyömaiden hiilijalanjäljen arvioinnin. Keskeistä laajamittaisen korjaushankkeen elinkaaren hiilijalanjäljen arviointimenetelmässä on, ettei arvioinnissa lasketa takautuvasti korjaushanketta edeltäviä elinkaaren vaiheiden hiilijalan- tai -kädenjälkeä. (Ympäristöministeriö 2019a s. 17; ss. 23–24; ss. 27–28; s. 35; Dodd et al. 2021b ss. 24–25)

Korjausrakentamisen skenaarioita mallinnettaessa korjaustoimenpiteiden yhteydessä säilytettävät materiaalit merkattiin laskentaan uudelleen käytettyinä materiaaleina (ohjelmassa ”reused material”) sekä materiaalien kuljetusmatkat valmistuksesta työmaalle merkittiin nollassi. Tämän lisäksi korjausrakentamisen skenaarioita laskettaessa, säilytettävien materiaalien työmaalla syntyvän hukan määrä merkittiin nollassi. Näin ollen ohjelma ei laske tarkasteluhetkestä eteenpäin rakennuksen elinkaaren moduulien A1-A5 (kuva 1) aikana muodostuneita hiilidioksidipäästöjä.

Rakennusmateriaalien läpikäynnin jälkeen laskentaohjelmaan syötettiin rakennuksen vuotuisen energiankulutuksen arvio, sisältäen keskimääräisen sähkön kulutuksen sekä kaukolämmityissä kohteissa kaukolämmön kulutuksen. Energiankulutukseen arvioitiin myös kaukokylmän kulutus kaukolämmityissä kohteissa. Energiankulutukseen olisi mahdollista syöttää myös vuotuinen polttoaineiden kulutus sekä ulkopuolelle toimitetun energian määrä, joita tarkasteltavissa skenaarioissa ei olla otettu huomioon. Level(s)-menetelmässä syötetään laskentatyökaluun myös käyttöveden vuotuinen kokonaiskulutus.

Level(s)-menetelmässä syötetään manuaalisesti myös kohteen rakentamisprosessin aikaiset tekijät, joita Ympäristöministeriön arviointimenetelmässä arvioidaan taulukkoarvoin. Rakentamisprosessin osalta laskentaohjelmaan syötettiin ilmastotyyppin sekä rakentamisen pinta-alan perusteella arviokkenaario. Rakentamisen pinta-alaksi syötettiin

uudisrakennusten skenaariossa koko rakennuksen pinta-ala ja korjausrakentamisen skenaarioissa erikseen arvioitu 40 % osuus koko rakennuksen pinta-alasta.

Vaikka Ympäristöministeriön arviointimenetelmä (2019) tai Level(s)-menetelmä eivät ohjeista tontilla jo olemassa olevan rakennuksen purun tai korjaustoimenpiteitä edeltävän purun huomioimista osaksi elinkaaren hiilijalanjäljenlaskentaa, on uuden rakennuksen elinkaarta mahdollistavan purun päästövaikutuksilla merkitystä päätöksenteossa ero toteutusratkaisujen toteutusta vertailtaessa. Tässä tutkimuksessa uudisrakentamisen skenaarioissa tontilla olemassa olevan rakennuksen purku on laskettu manuaalisesti mukaan eri skenaarioiden elinkaaren hiilijalanjälkeen.

Laskentaohjelma mahdollistaa jo luotujen suunnitelmien kopioimista. Mallinnettujen uudis- ja skenaarioiden jälkeen niiden suunnitelmat kopioitiin ja muodostettiin seuraavat skenaariot. Skenaarioissa muokattiin taloteknisten järjestelmien osalta lämmitys- ja sähköntuotanto järjestelmien aiheuttamat muutokset sekä järjestelmien vaikutukset kohteen energiankulutukseen huomioitiin laskentaohjelmaan.

Laskennan suorittamisen jälkeen laskenta tarkastettiin manuaalisesti sekä hyödyntämällä laskentaohjelman omaa luotettavuusarviointia. Lisäksi tuloksia verrattiin jo suoritettuihin tutkimuksiin. Laskennan tarkastuksen jälkeen tulokset analysoitiin ja arvioitiin. Tulosten analysointi ja arviointi on käsitelty luvussa 5.

4.4 Laskennassa tehdyt rajaukset ja oletukset

Elinkaariarvioinnissa saadut tulokset ovat vertailtavissa vain, jos tehdyt oletukset sekä tarkastelun tausta ovat eri arvioinneissa toisiaan vastaavat (SFS-EN ISO 14040 s. 10) Kohteen materiaalien ja niiden määrien mallintamisessa One Click LCA -ohjelmassa jouduttiin tekemään rajauksia sekä oletuksia laskennan suorittamiseksi ja mahdollisimman vertailtavan ja todenmukaisen tuloksen saavuttamiseksi. Rakennuksen elinkaari päästön lähtötason luomisen jälkeen, määritettiin rakennuksen materiaaleille tarkemmat parametrit sekä määrät.

Laskennan rajauksen ja mallinnettavien materiaalien sekä rakennusosien pohjana käytettiin Level(s)-menetelmän minimilaajuutta, joka on pääosin yhtenevä myös Ympäristöministeriön arviointimenetelmän laajuuden kanssa. Ympäristöministeriön arviointimenetelmän mukaisesti arvioinnin ulkopuolelle jätettiin materiaalien osuudesta listoitus, puu- ja metalliovien heloitus, varusteet sekä kohteen sisäpintojen maalaukset. Laskennan ulkopuolelle jätettiin myös kohteen piha-alueet ja sen sisältämät varusteet sekä taukotilavarausten keittiökalusteet ym. naulakko- ja wc-tilojen kalusteet. Laskennassa ei huomioitu myöskään keittiöiden laitteita ja muita koneita.

Taulukko 6. Level(s)-arviointimenetelmän minimilaaajuuteen sisällytettävät rakennusosat ja materiaalit (Dodd et al. 2021b ss. 29–30)

Rakennusosa	Sisällytettävä osa tai materiaali
Rakennuksen ulkokuori	
<i>Kantavat runkorakenteet</i>	Runko (Pilarit, palkit ja laatat) Ullakko- ym. kerrokset Ulkoiset seinät Parvekkeet
<i>Kantamattomat tukirakenteet</i>	Maanvarainen laatta Sisäseinärakenteet, tilajakajat ja ovet Portaat ja rampit
<i>Julkisivut</i>	Ulkoseinäjärjestelmät, -verhous ja varjostusjärjestelmät Julkisivun aukotukset, ml. ikkunat ja ulko-ovet Julkisivun maalit, pinnoitteet ja päällysteet
<i>Yläpohja</i>	Rakenteet Sääsuojaus
<i>Pysäköintitilat</i>	Maanpäälliset ja -alaiset pysäköintitilat, rakennuksen rajauksen ja käyttäjien osalta
Rakennuksen sisäpuoli (kalusteet, huonekalut ja palvelut)	
<i>Kalusteet ja huonekalut</i>	Kylpyhuonekalusteet Kaapit ja työtasot Lattiapäällysteet ja -pinnoitteet Listat Pistorasiat ja katkasijat Seinien ja katon tasoitteet ja pintamateriaalit
<i>Sisäänrakennettu valaistusjärjestelmä</i>	Valaisimet Ohjaus- ja säätöjärjestelmät sekä sensorit
<i>Energiajärjestelmät</i>	Lämmöntuotto ja -jakelu Patterit Jäähdytyskeskus ja jakelujärjestelmä Sähköntuotto ja -jakelu
<i>Ilmanvaihtojärjestelmä</i>	Ilmanvaihtolaitteet Johdot, kanavat ja jakelujärjestelmät
<i>Vesi- ja viemärijärjestelmät</i>	Kylmän- ja kuumaveden jakelu Vedenkäsittelyjärjestelmät Viemärijärjestelmät
<i>Muut järjestelmät</i>	Hissit ja liukuportaat Palontorjuntajärjestelmät Kommunikaatio- ja turvallisuusjärjestelmät Tietoliikennejärjestelmät
Ulkopuoliset työt	
<i>Talotekniikan laitteistot</i>	Putkien liitännät ja ohjaukset Sähkön ala-asemat ja laitteistot
<i>Maisemointi</i>	Päällysteet ja kiveykset Aidat, kaiteet ja seinät Kuivatusjärjestelmät

Carbon Designer määrittää rakenteiden pinta-alat arvioitujen ja syötettyjen rakennuksien mittojen perusteella verraten niitä rakennustyyppin keskiarvoon. Työn kirjoitushetkellä Carbon Designer -työkalu ei kykene tunnistamaan monimutkaisemman muotoisia rakennuksia, jolloin tarkasteltavan kohteen ollessa muodoltaan muu kuin suorakulmainen, täytyi rakenteiden, johon rakennuksen muoto vaikuttaa, pinta-alat laskea erikseen. Rakenteiden pinta-alat tarkastettiin ja muokattiin saatavien lähtötietojen rajoissa, jonka jälkeen

pinta-alojen avulla muodostettiin rakennuksen elinkaaripäästöjen lähtötaso. Laskennan alkuvaiheessa hyödynnettävä laskentaohjelman sisältämä Carbon Designer -työkalu olettaa automaattisesti rakennuksen suorakulmion muotoiseksi. Laskentaan mallinnettava tarkasteltava rakennus on L-kirjaimen muotoinen, jolloin Carbon Designer arvioi kohteen ulkoseinien ja ikkunoiden pinta-alat todellisuutta suuremmiksi. Lähtötason tarkan tuloksen saamiseksi rakennuksen ulkoseinien pinta-ala laskettiin uudelleen. Rakennuksen ollessa osa korttelia, myös rakennuksen muihin rakennuksiin liittyvät seinät huomioitiin vähentämällä ne pois varsinaisesta laskennasta. Myös ikkunoiden määrä ja niiden pinta-ala vähenee julkisivun pinta-alan ja tarkasteltavien seinien määrän pienentyessä. Koska kohteen kaikki ikkunat tullaan vaihtamaan, otettiin ikkunoiden pinta-ala korjaustoimenpiteiden määräluettelosta.

Olemassa olevasta rakennuksesta ei ollut saatavilla nykytilannetta kuvaavaa määräluetteloa, jolloin mallinnettavien rakenteiden ja materiaalien pinta-aloja sekä määrää arvioitiin yhdistelemällä pohjapiirustuksista, Carbon Designer:ista sekä määräluettelosta saatavaa määrätietoa. Rakennusmateriaalien ja -osien, joiden korjausasteesta ei ollut erillistä lähtötietoa, säilytettävän ja uusittavan materiaalin määrä arvioitiin vertaamalla pohjapiirustuksia ja määräluetteloa keskenään, jolloin säilytettävän materiaalin määräksi saatiin pohjapiirustuksessa ja määräluettelossa olevien pinta-alojen erotuksena. Jos ero oli hyvin pieni (esimerkiksi 10 m²), arvioitiin materiaali tai rakennusosa kokonaan vaihdettavaksi.

Kokonaan säilytettävien ja vaikeasti arvioitavien rakenneosien määrät otettiin suoraan Carbon Designer:in muodostamista pinta-ala arvioista. Nämä rakennusosat olivat anturat, ulkoseinät, ontelolaatat, maanvaraiset alapohjat, yläpohjat, väestönsuojarakenteet sekä kantavat väliseinät. Kohteen pilareiden arvioitiin olevan keskimäärin kokoa 400x400. Rakennuksen toisessa siivessä pilarit ulottuivat kerroksesta 1 kerrokseen 7 ja niitä oli yhteensä 10 kappaletta. Toisessa siivessä pilareita oli yhteensä 6 kappaletta kerroksesta 2 kerrokseen 7. Pinta-alojen ja korkeuksien avulla laskettu pilarien tilavuus mallinnettiin ohjelmaan teräsbetonisuorakaidepilarina.

Pohjapiirustuksista määritettiin eri tilojen pinta-alat, joita hyödynnettiin lattia- ja alakattorakenteiden pinta-alojen mallintamisessa. Peruskorjauksen määräluettelossa oli eroteltu uusien sekä korjattavien puu-, metalli- ja lasiovien määrät, joiden pohjalta näiden rakenneosien määrät mallinnettiin laskentaan. Kevyiden väliseinien sekä järjestelmäseinien oletettiin vaihtuvan kokonaan peruskorjaus toimenpiteiden myötä, jolloin näiden rakenteiden määrät arvioitiin korjaustoimenpiteiden määräluettelon avulla.

Ulko- ja sisätilojen korjauksessa kerroksiin 2.–6. suunniteltiin korjaustoimenpiteiden yhteydessä asennettavaksi peltiverhousta sekä muualle osittain rappautta. Näin ollen ohjelmaan arvioitiin peltiverhouksen (teräsjulkisivu, maalattu) osuuden olevan 80 % ja ohutrappauksen 20 %. Uudisrakennusten skenaarioissa ohutrappautta ei huomioida vaan koko julkisivu oletetaan verhoiltavaksi peltiverhouksella. Kohteesta saatavilla olevien valokuvien mukaan olemassa olevan rakennuksen julkisivusta on tiiliverhoilua. Erillistä mainintaa tiiliverhoilusta ei löytynyt saatavilla olevista julkisivun kuntotutkimuksesta tai muista suunnittelu- ja dokumenteista, joten julkisivun tiiliverhoilu jätettiin mallintamatta korjausrakennusten skenaarioiden laskentaan.

Mallinnettaessa sisäseinä, ohjelmaan tuli eritellä tarkemmin kevyiden sisäseinien ja niiden sisältämien ovien määrät ja osuudet toisiinsa nähden. Kohteessa on toimistorakennukselle tyypillisesti kevyinä väliseinäinä lasiseiniä ja ohutta teräsrankaista kipsilevyseinää. Lisäksi ohjelma ei erikseen tunnista sisäovia ja niiden määrää. Kohteeseen tulevat lasiovet laskettiin osaksi lasiseinäarakenteita. Kohteen sisäovien määrä laskettiin kohteeseen tulevien uusien sisäovien ja korjattavien ovien summana. Ovet oletettiin samankokoisiksi (9x21), jonka pohjalta sisäovien pinta-ala saatiin laskettua. Ulko-ovien osalta yhteen oveen oli laskettu kunnostusvaraus ja muut ovet oli laskettu kunnostettaviksi. Koska yhden oven kohdalla kyseessä oli varaus, oletetaan kaikki ulko-ovet kunnostettaviksi, jolloin ne merkataan laskentaohjelmaan säilytettäväksi. Kaikki märkätilojen ovet oletettiin uusittaviksi. Kohteessa olevat pariovet mallinnettiin laskennassa kertomalla yksittäisten ovien määrä kahdella. Tämä toisaalta kasvattaa karmien osuutta laskennassa. Kohteen lujitemuoviovet mallinnettiin ohjelmaan tavallisina puuovina. Kohteen puulistat mallinnettiin laskentaan korjaustoimenpiteiden määräluettelon perusteella.

Korjausten yhteydessä säilytettävän märkätilojen seinälaatoituksen määrä laskettiin vähentämällä laskentaohjelman Carbon Designer:in arvioiman märkätilojen seinälaatoituksen määrästä määräluettelosta saatavan korjattavan märkätilojen seinälaatoituksen määrän. Kohteessa olevien suihkujen ovet oletettiin lasioviksi ja ne mallinnettiin ohjelmaan muodostamalla uusi rakennusosa lämpökarkaistusta lasista ja lasioven mekanismeista.

Talotekniikan olosuhde- ja järjestelmäkuvauksessa ilmoitettiin kohteen lämmityspatterit säilytettäväksi ennallaan niin, että termostaattit uusitaan. Termostaattien vaihdon ilmastovaikutus oletetaan pieneksi, jolloin koko kohteen patteriverkosto mallinnettiin laskentaan korjausskenaarioissa säilytettäväksi. Termostaattien vaihdon vaikutus kohteen energiankulutukseen huomioitiin arvioitaessa kokonaisuudessa korjaustoimenpiteiden vaikutusta energiankulutukseen. Kohteen viemäriputkisto on ilmoitettu tutkittavaksi ja tut-

kimuksen mukaan korjattavaksi. Viemäriputkisto, sähköasennukset sekä ilmanvaihtojärjestelmä mallinnettiin laskentaan korjausasteen mukaisesti 45 % korjattavaksi. Kohteen vesijohtojärjestelmä oletetaan uusittavaksi kokonaan. Valaistusjärjestelmään kohdistuvat toimenpiteet arvioitiin kohteen energiankulutuksen pienenemisessä. Level(s)-menetelmän mukaan kohteen pistorasiat ja katkaisijat tulisi huomioida. Koska tarkkaa määrää kohteen pistorasioiden ja katkaisijoiden määrästä ei ollut tarkkaa tietoa, määrä arvioitiin hyvin suhteellisesti, olettaen että asennettavien pistorasioiden määrän olevan noin 500 kappaletta. Kiinteitä valokatkaisimia oletetaan asennettavaksi noin 250 kappaletta.

Korjaustoimenpiteiden vaikutuksen kohteen energiankulutuksen tasoon oletettiin syntyvän pääosin kohteen säätö- ja automaatio- sekä ilmanvaihtojärjestelmiin sekä valaistuksen automatisointiin kohdistuvien toimenpiteiden seurauksena. Viimeisin tieto olemassa olevan rakennuksen energiankulutuksen tasosta löytyi vuonna 2012 suoritetusta energiakatselmuksesta, jossa on kuvattu myös ehdotustoimenpiteitä energiankulutuksen pienentämiseen ja toimenpiteiden vaikutusta energiankulutukseen. Korjausten yhteydessä toteutettavien energiatehokkuutta parantavien, erityisesti taloteknisiin järjestelmiin kohdistuvien nykyaikaisten toimenpiteiden, oletetaan kuitenkin pienentävän kulutuksen tasoa energiakatselmuksen määriä voimakkaammin.

Koska kohteesta ei ollut löydettävissä energiatodistusta ja energiankulutuksen arviot perustuivat lähes kymmenen vuotta sitten suoritettuun energiakatselmuksen, käytettiin reaaliaikaisten energiankulutusten taso myös vertaamalla arvioituja kulutuksen tasoja Asumisen rahoitus- ja kehittämiskeskuksen (ARA) ylläpitämästä energiatodistusrekisteristä löydettäviä rakennusta vastaavien toimistorakennusten energiatodistuksia. Rekisteristä haettiin pinta-alan laajuudeltaan samaa luokkaa olevat toimistorakennukset, joiden talotekniset järjestelmät vastasivat sekä uudis- että korjausrakentamisen simuloitavia skenaarioita. Peruskorjaamisen skenaarion arviointiin hyödynnettiin Helsingissä sijaitsevan vuonna 1984 valmistuneen toimistorakennuksen peruskorjauksen rakennuslupaa varten vuonna 2021 luotua energiatodistusta (todistustunnus 231370). Kohteiden talotekniset järjestelmät ovat identtisiä, lämmitetty nettoala samaa suuruusluokkaa sekä ilmasto-olosuhteet samat. Kulutuksen arvioinnissa hyödynnettävästä kohteesta on löydettävissä julkisten hankintojen hankintailmoitus, jossa kuvatut korjaustoimenpiteet vastaavat simuloitavassa kohteessa suoritettavia korjaustoimenpiteitä. Energiatodistuksesta hyödynnettiin sähkön- sekä kaukolämmön kulutuksen arvoja.

Uudisrakentamisen skenaarioiden energiakulutuksen arviointiin hyödynnettiin myös energiatodistusrekisteriä ja skenaarioiden energiankulutus arvioitiin Helsingissä sijaitsevan vuonna 2019 valmistuneen toimistorakennuksen perusteella (todistustunnus 164575), jossa perusskenaarioissa rakennus lämpenee ja jäähtyy kaukolämmöllä ja -

kylmällä, kohteessa on koneellinen tulo- ja poistoilmanvaihtojärjestelmä lämmöntalteenotolla sekä erona korjausrakentamiseen kohteen lämmönjako on toteutettu vesikiertoisella kattosäteilylämmityksellä.

Vertailtaessa uudis- sekä korjausrakentamisen skenaarioiden energiankulutuksen arvioinnissa hyödynnettäviä todistuksia, on korjauskohteen kaukokylmän kulutus uudisrakennusta pienempi. Simuloitavat uudis- ja korjausrakennukset ovat pääosin ulkoseinän eristepaksuutta lukuun ottamatta identtisiä, jolloin merkittävää perusteltua syytä ei ole arvioida korjauskohteen jäähdytystarvetta uudiskohdetta pienemmäksi. Tämän vuoksi uudis- ja korjausrakentamisen skenaarioiden kaukokylmän kulutus on arvioitu yhtä suureksi kaukokylmää käyttävien skenaarioiden osalta. Uudisrakentamisessa oletettiin sähkön ja lämpöenergian kulutuksen osalta päästävän matalampaan energiankulutuksen tasoon, koska kohteeseen asennettavat talotekniikkajärjestelmät ovat täysin uusia uudisrakentamisen yhteydessä verrattuna korjausrakentamiseen, jossa joitain järjestelmän osia säilytetään.

Maalämpöä tarkasteltavissa skenaarioissa kohteen kaukolämmönkulutus on merkitty laskentaohjelmaan nollassa ja maalämpöjärjestelmän aiheuttamat päästöt on huomioitu materiaalipuolella sekä maalämpöjärjestelmän energiankulutus on lisätty kohteen sähkönkulutukseen. Lämpöpumpun hyötysuhteeksi (COP=coefficient of performance) on arvioitu COP=3, eli 1 kW sähköenergiaa tuottaa 3 kW lämpöenergiaa. Maalämpölaitteiston lisäämä sähkönkulutus on laskettu tällöin jakamalla kohteen lämmitystehontarve, eli muissa skenaarioissa kaukolämmitystehontarve, jaettuna kolmella.

Aurinkosähköjärjestelmiä mallinnettavissa skenaarioissa aurinkosähköjärjestelmä tuli mitoittaa itse ennen laskentaa. Tarkasteltavan toimistorakennuksen sähkönkulutuksen pohjatehon oletettiin olevan noin 4 W/m², jolloin koko rakennuksen pohjakulutus on 52,5 kWh/h. Järjestelmä mitoitettiin järjestelmän pohjakulutuksen, eli pienimmän mahdollisen tehontarpeen perusteella, jolloin laskenta perustuu aurinkosähkön kulutukseen välittömästi paikan päällä (Motiva Oy 2021b). Hyödyntämällä Motiva Oy:n verkkosivuillaan (2021c) esittämää aurinkosähköjärjestelmän kannattavuuslaskelmaa, muodostettiin case-kohteelle keskimääräinen arvio aurinkosähköjärjestelmän tuotosta ja vaikutuksesta kohteen sähkönenergiankulutukseen. Asennettavan aurinkojärjestelmän paneelien pinta-alaksi arvioitiin 254 m², jolloin koko järjestelmän vuotuiseksi tuotoksi saatiin 44 625 kWh. Laskennassa oletettiin, että kaikki tuotetut aurinkosähköt otetaan omaan käyttöön. Aurinkosähkön osuus huomioitiin laskennassa vähentämällä aurinkosähkön vuotuisen tuoton osuus vuotuisesta sähkönkulutuksesta.

Käytetty laskentaohjelma arvioi rakennusaikaiset (moduuli A5) päästöt automaattisesti lämmitetyn nettoalan perusteella uudisrakennukselle, jolloin ohjelmassa ei ole suoraan mahdollista arvioida korjaustyömaan rakennusaikaisia (A5) päästöjä. Korjaustyömaan ympäristövaikutusten arvioimiseksi muodostettiin erillisten tutkimusten perusteella suhde, jonka pohjalta arvioitiin laskentaohjelmaan syötettävän rakennuksen pinta-alan suuruus. Kerrostalotyömailla suoritetussa tutkimuksen tuloksissa havaittiin, että työmaa-aikaisista päästöistä suurin osa syntyy rakennuksen energiankulutuksesta, eli työmaatoimintojen sähkön- sekä lämpöenergiankulutuksesta. Työmaan polttoainekulutuksen, veden kulutuksen sekä rakennusjätteen synnyn aiheuttamat päästöt ovat arviolta noin 15 % energiankulutuksesta (Ahola & Liljeström 2018 s. 36).

Laskennan kohteen työmaa-aikaisten päästöjen arvioinnissa oletettiin, että toimistorakennuksen työmaa-aikaiset päästöt jakautuvat energian, polttoaineiden, veden kulutuksen sekä rakennusjätteen synnyn välillä samassa suhteessa. Koska polttoaineiden ja vedenkulutuksen osuus on verrattain pieni, arvioidaan korjausrakentamisen työmaa-aikaista päästövaikutusta energiankulutuksen avulla. Hämäläinen arvioi diplomityössään (2012), että rakennuksen työmaa-aikaisesta energiankulutuksesta noin 60 % syntyy runkovaiheen aikana ja loput 40 % sisätyövaiheen aikana. Koska korjausrakentamisen skenaarioissa säilytettävät rakenteet ovat pääosin runkorakenteita, oletettiin sisätyövaiheen osuuden perusteella korjaustyömaan kattavan 40 % uudistyömaan pinta-alasta. Laskentatyökaluun syötettiin korjausrakentamisen skenaarioiden osalta rakentamisprosessin kattavan 40 % koko rakennuksen pinta-alasta.

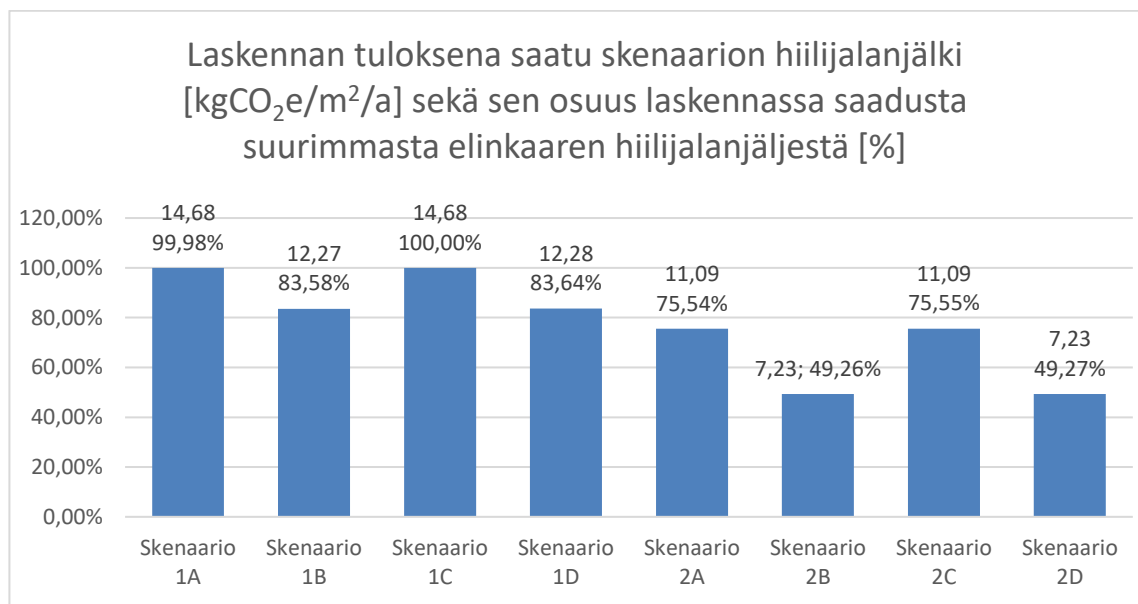
Purkavassa uudisrakentamisessa ennen uutta elinkaarta tapahtuva purku A0, on arvioitu olemassa olevan rakennuksen purun päästöjen avulla. Laskentaa suoritettaessa, laskentaohjelmaan simuloitiin myös tontilla olemassa oleva rakennus ja sen elinkaaren aikaiset ympäristövaikutukset laskettiin. Laskennan tuloksena saatua olemassa olevan rakennuksen elinkaaren lopun (C1-C4) moduulin päästöjen määrää hyödynnettiin suoraan ennen uuden elinkaaren purun ilmastolämpenemispotentiaalin arvioimiseen. Korjausrakentamisen yhteydessä korjaustoimenpiteitä edeltävän purun päästöt arvioitiin vähentämällä säilytettävien rakenteiden elinkaaren lopun päästövaikutus edellä mainitun olemassa olevan rakennuksen elinkaaren lopun päästövaikutuksesta.

5. LASKENNAN TULOSTEN ANALYSOINTI

Tässä luvussa esitetään tutkimuksen kannalta keskeisimmät elinkaaren hiilijalanjäljen laskennan tulokset. Tuloksia analysoidaan tarkemmin verraten niitä aikaisempiin tutkimuksiin ja niissä saatuihin tuloksiin. Lisäksi luvussa tarkastellaan tulosten luotettavuutta sekä työn lähtökohtien ja olemassa olevien lähtötietojen vaikutusta tuloksiin ja niistä tehtäviin johtopäätöksiin.

5.1 Laskennan tulokset

Tässä luvussa tarkastellaan eri skenaarioiden hiilidioksidipäästöjen mallintamisen tuloksia. Mallintaminen ja laskenta suoritettiin luvussa 4 kuvatulla menetelmällä One Click LCA-ohjelmistolla luvussa esitetyin Level(s)-menetelmän mukaisin rajauksin. Laskennan tavoitteena oli tarkastella vertailevasti rakennuksen purkavan uudisrakentamisen ja kohteen korjausrakentamisen vaikutusta elinkaaren aikaisiin päästöihin. Lisäksi kohteen uudis- ja korjausrakentamisesta muodostettiin vertailevia skenaarioita maalämmön sekä aurinkosähkön käytöstä. Laskennan tuloksia analysoidaan tarkemmin kappaleessa 5.2.



Kuva 10. Eri skenaarioiden osuudet (%) laskennassa suurimmasta elinkaaren hiilijalanjäljestä sekä laskennan tuloksena saadut skenaarioiden hiilijalanjäljet (kgCO₂e/m²/a) sisältäen ennen elinkaarta tapahtuvan purun

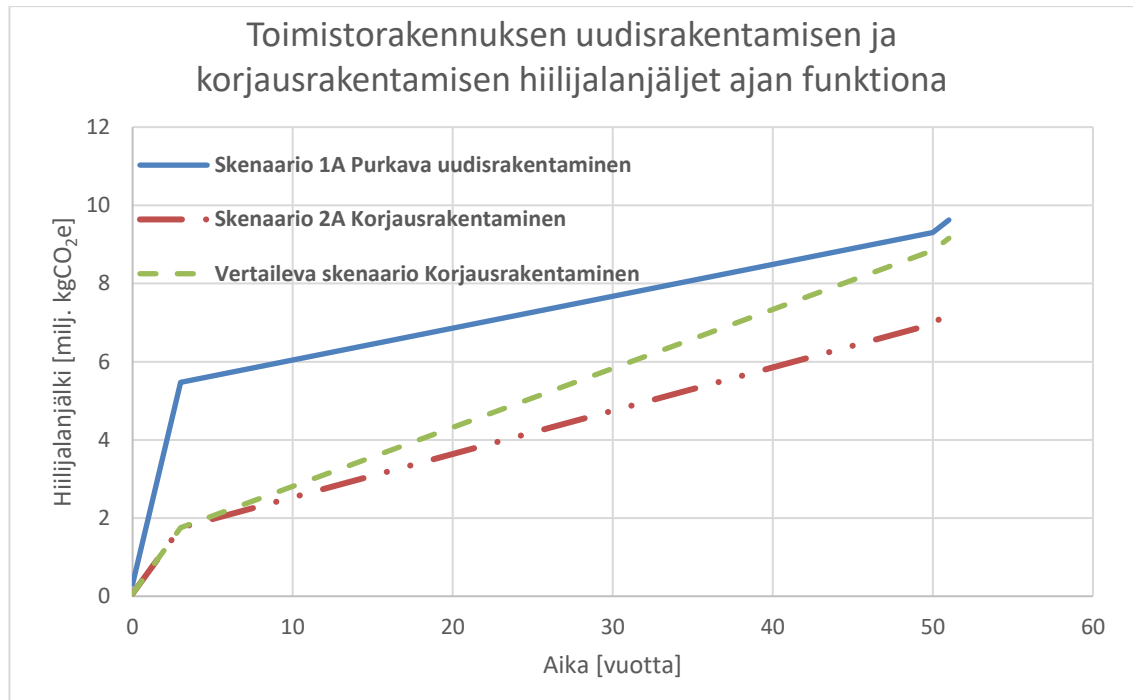
One Click LCA-ohjelma antaa Level(s)-menetelmän laskennan ilmastonlämpenemispotentiaalin (GWP) tulokset koko elinkaaren ajalle (yks. kgCO₂e). Ympäristöministeriön arviointimenetelmän (2019a) mukaan laskennan tulokset raportoidaan jyvitettyinä (yks. kgCO₂e/m²/a) laskentajaksolle (50 vuotta) sekä lämmitetyille nettoalalle (13 114 m²).

Suurin koko elinkaaren ja elinkaaren jyvitetty hiilijalanjälki oli skenaarioilla 1C (14,68 kgCO₂e/m²/a; 9 625 224 kgCO₂e), joka tarkastelee purkavaa uudisrakentamista, johon liitetään aurinkopaneelit. Mallinnuksessa vähäpäästöisin oli skenaario 2B koko elinkaaren hiilijalanjäljellä 7,23 kgCO₂e/m²/a (4 742 278 kgCO₂e), jossa peruskorjauksen yhteydessä kiinteistö liitettäisiin maalämpöön. Taulukossa 7 on esitetty laskennassa saatu koko elinkaaren hiilijalanjälki sekä eri elinkaaren vaiheiden hiilijalanjäljet sekä niiden prosenttiosuudet koko elinkaaren hiilijalanjäljestä.

Taulukko 7. *Mallinnettujen skenaarioiden hiilidioksidipäästöt lämmitettyä nettoalaa kohden vuosittain elinkaaren vaiheittain [kgCO₂e/m²a]*

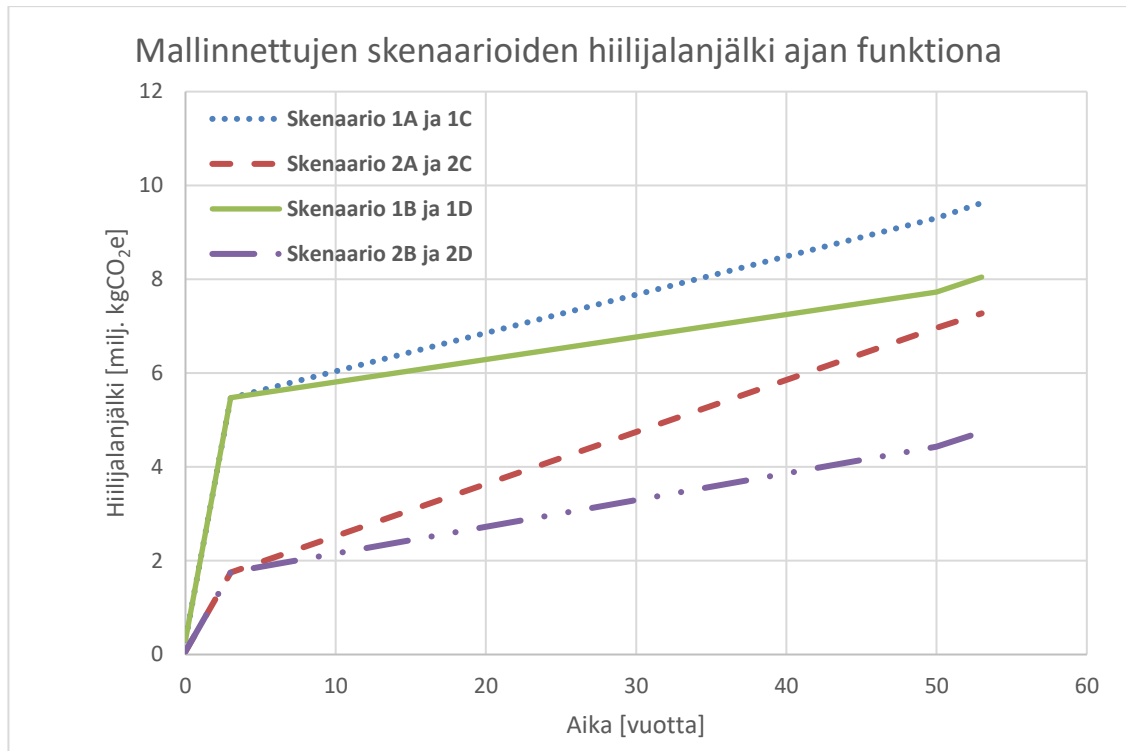
	Purku ennen uutta elinkaarta A0	Tuotevaihe A1-A5	Käyttövaihe B1-B7	Elinkaaren loppu C1-C4	Koko elinkaaren hiilijalanjälki	Koko elinkaaren hiilijalanjälki (sis. purku)	Hiilikädenjälki D
Skenaario 1A:	0,475	7,866	5,852	0,487	14,20	14,68	-1,246
Skenaario 1B:	0,475	7,874	3,436	0,487	11,80	12,27	-1,248
Skenaario 1C:	0,475	7,921	5,798	0,487	14,21	14,68	-1,246
Skenaario 1D:	0,475	7,929	3,388	0,487	11,80	12,29	-1,248
Skenaario 2A:	0,101	2,571	7,944	0,475	10,99	11,09	-1,130
Skenaario 2B:	0,101	2,581	4,075	0,475	7,13	7,23	-1,119
Skenaario 2C:	0,101	2,626	7,891	0,475	10,99	11,09	-1,130
Skenaario 2D:	0,101	2,637	4,022	0,475	7,13	7,21	-1,119

Ennen varsinaisten tarkasteltavien skenaarioiden laskentaa, simulointiin laskentaohjelmaan myös vertaileva skenaariossa, jossa rakennukseen suoritetaan samat korjaustöidenpiteet kuin varsinaisiin korjausrakentamisen skenaarioihin, mutta kohteen energiankulutuksen taso ei parane olemassa olevan rakennuksen nykyisen energiankulutuksen tasosta. Skenaarioiden 1A ja 2A sekä vertailevan skenaarion hiilijalanjäljen muodostuminen elinkaaren aikana on kuvattu kuvassa 11.



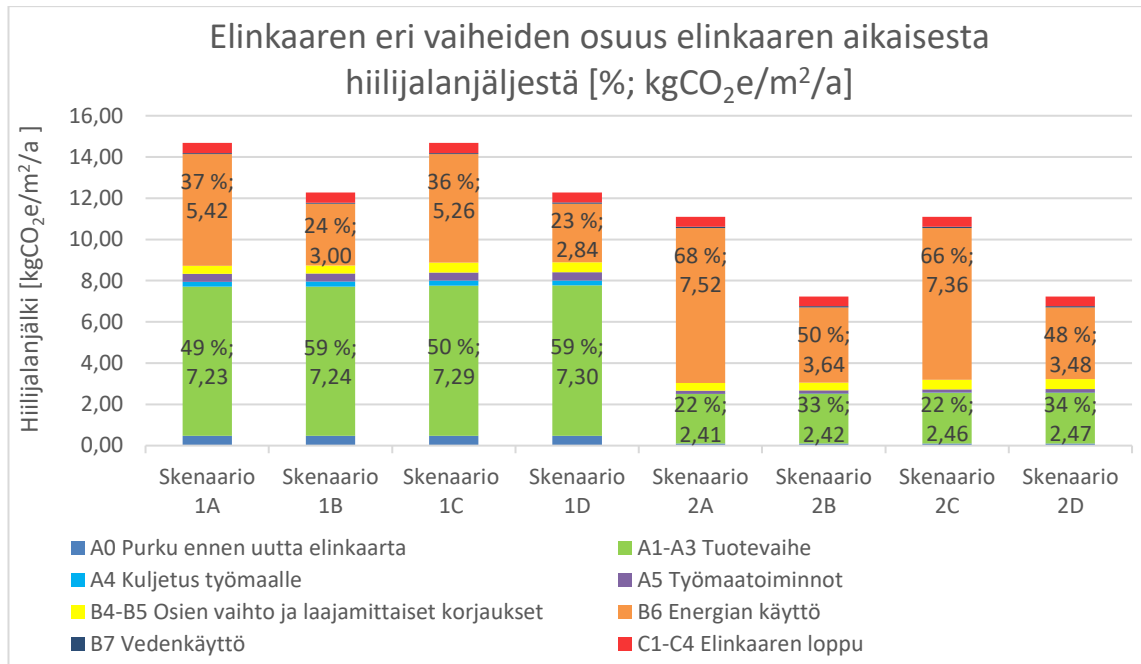
Kuva 11. Simuloidun toimistorakennuksen purkavan uudisrakentamisen ja korjausrakentamisen hiilijalanjäljet ajan funktiona

Tarkastellessa laskennan tuloksia, erityisesti eri skenaarioiden elinkaaren vaiheiden hiilijalanjälkeä, havaitaan että tiettyjen skenaarioiden tulokset vastaavat toisiaan. Mallinnettaessa eri skenaarioiden hiilijalanjälkeä ajan funktiona, havaitaan että skenaarioiden 1 ja 1C, skenaarioiden 2A ja 2C, skenaarioiden 1B ja 1D sekä skenaarioiden 2B ja 2D tulokset vastaavat toisiaan ja tämän vuoksi asettuvat samalle kuvaajalle mallinnettaessa elinkaaren aikaisen hiilijalanjäljen muodostumista ajan funktiona. Kuvassa 12 on esitetty laskennassa tarkasteltujen skenaarioiden hiilijalanjälki ajan funktiona. Edellä mainitut samalle kuvaajalle asettuvat skenaariot on merkitty kuvaan yhtenä viivana. Kuvaajissa on otettu huomioon ennen varsinaista rakentamista tapahtuva joko koko rakennuksen purku tai korjaustoimenpiteiden yhteydessä yksittäisten rakennusosien ja -materiaalien purku, jolloin elinkaaren ajanhetkellä nolla, skenaarion elinkaaren kertynyt hiilijalanjälki on purun aiheuttaman hiilijalanjäljen suuruus. Rakentamisvaihe sisältäen tuotevaiheen (A1-A3) ja rakentamisen (A4-A5) on esitysteknisistä syistä merkitty kestävän kolme vuotta. Rakennuksen purkaminen on laskettu tapahtuvan elinkaaren alusta laskettuna vuosina 50 ja 51.



Kuva 12. Simuloitujen skenaarioiden hiilijalanjälki ajan funktiona

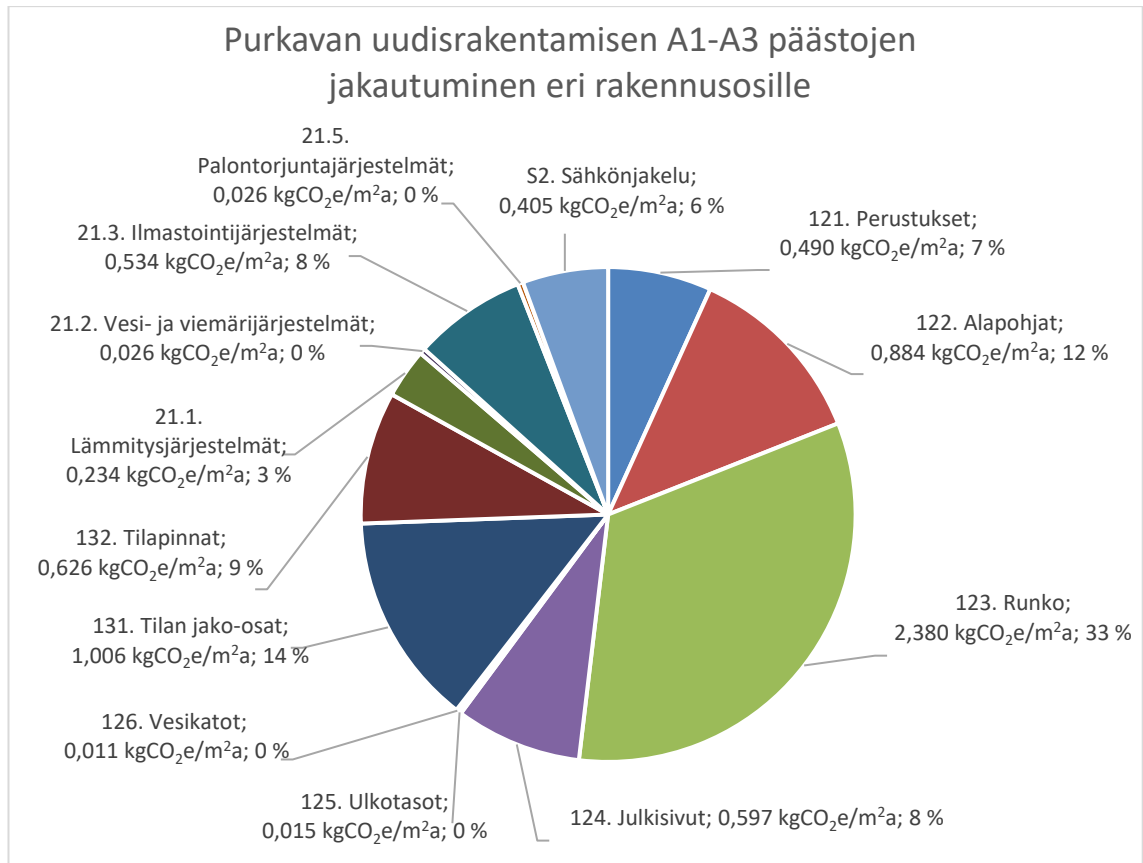
Tarkasteltaessa eri elinkaaren vaiheiden osuutta simuloitujen skenaarioiden hiilijalanjäljestä (kuva 13), korostuu kaikissa skenaarioissa tuotevaiheen (A1-A3) sekä käyttövaiheen energiankulutuksen (B6) osuus. Suurin tuotevaiheen osuus on skenaariolla 1D, joilla tuotevaiheen hiilijalanjälki on noin 7,30 kgCO₂e/m²a (59 % koko elinkaaren hiilijalanjäljestä). Skenaariolla 2A on pienin materiaalien hiilijalanjälki sen osuuden ollessa 22 % skenaarion koko hiilijalanjäljestä, eli noin 2,41 kgCO₂e/m²a. Skenaariolla 2A on suurin käyttövaiheen energian käytön hiilijalanjäljen osuus (7,52 kgCO₂e/m²a; 59 %). Pienin käyttövaiheen energian käytön osuus on skenaariolla 1D, moduulin B6 suuruuden ollessa 2,84 kgCO₂e/m²a (osuus skenaarion koko hiilijalanjäljestä 23 %). Kaikissa uudisrakentamisen skenaarioissa vanhan rakennuksen purun osuus koko elinkaaren hiilijalanjäljestä on korjausrakentamisen skenaarioita merkittävämpi, sen osuuden ollessa uudisrakentamisen skenaarioissa noin 3–4 % luokkaa. Korjausrakentamisen skenaariossa vanhojen rakennusosien purku ennen korjaustoimenpiteitä kattaa noin 1 % osuuden koko skenaarion hiilijalanjäljestä. Purkavan uudisrakentamisen skenaarioissa elinkaaren moduulin A5, eli rakentamisen osuus koko elinkaaren hiilijalanjäljestä on noin 3 %. Korjausrakentamisen skenaarioissa rakentamisen osuus on noin 1–2 %.



Kuva 13. Laskennassa simuloitujen skenaarioiden koko elinkaaren aikaisten päästöjen jakautuminen elinkaaren eri vaiheille

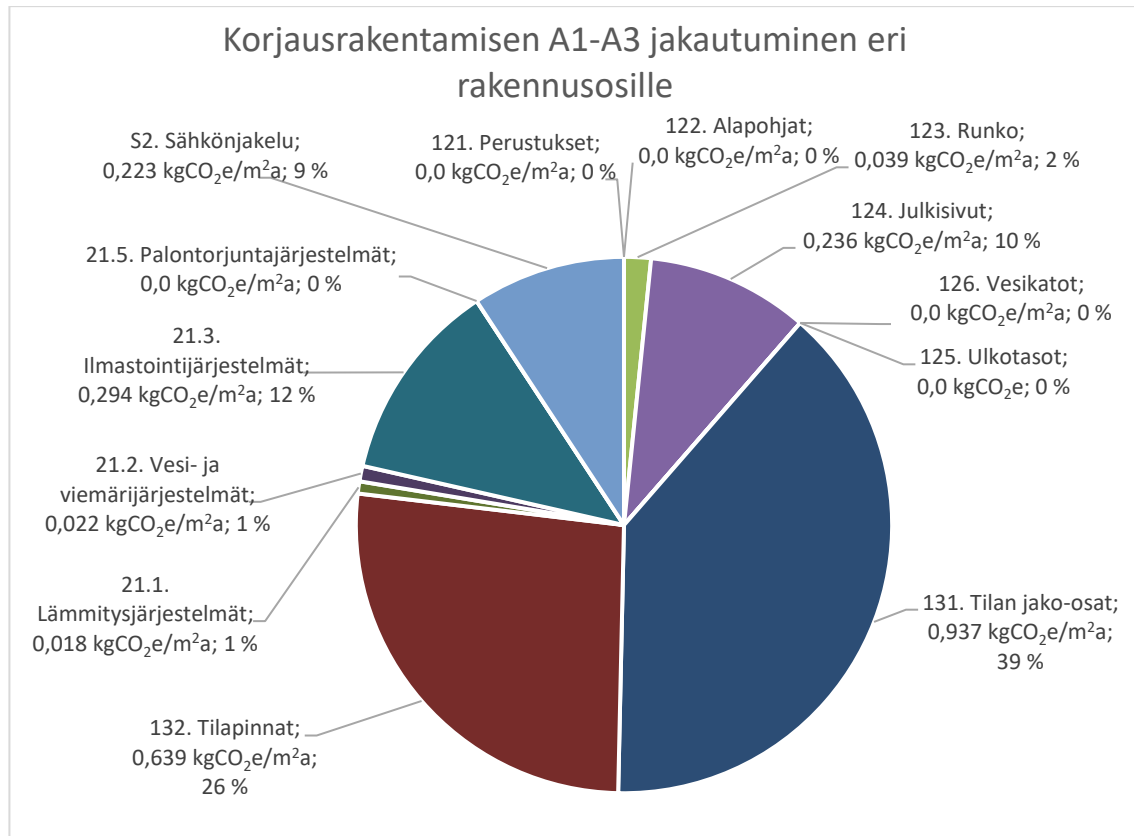
Laskennassa tarkasteltujen skenaarioiden päästölaskennan tarkemmat tulokset elinkaaren vaiheittain on esitetty liitteessä A. Tulosten tarkastelussa on huomioitavaa, että Level(s)-arviointimenetelmässä eikä Ympäristöministeriön arviointimenetelmässä huomioida laskennassa elinkaaren vaihetta B1, eli tuotteiden käytön ympäristövaikutusta. Tämän vuoksi liitteessä A olevassa taulukossa B1 moduulin päästöt kaikissa skenaarioissa on 0.

Vertailtaessa lähtökohtaisesti peruskorjaamista purkavaan uudisrakentamiseen sekä erilaisten taloteknisten toteutusratkaisujen vaikutusta elinkaaren hiilijalanjälkeen, on keskeistä tarkastella myös rakenteiden, materiaalien ja energian sekä veden käytön osuuksia elinkaaren päästöistä. Kuvassa 14 on esitetty kaukolämpöverkkoon liitetyn purkavan uudisrakentamisen tuotevaiheen A1-A3 päästöjen jakautumisen eri rakennusosille.



Kuva 14. Purkavan uudisrakentamisen tuotevaiheen A1-A3 hiilidioksidipäästöjen jakautuminen eri rakennusosille

Kuvassa 15 on esitetty kaukolämpöverkkoon liitetyn korjausrakentamisen skenaarion tuotevaiheen A1-A3 laskennassa saatujen hiilidioksidipäästöjen jakautumista eri rakennusosille. Sekä uudis- että korjausrakentamisen skenaarioissa, joissa kohde on liitetty maalämpöön, tai kohteeseen on asennettu aurinkosähköjärjestelmä, on rakenneosien prosentuaaliset osuudet kuvien 14 ja 15 mukaiset. Maalämpöön liitetyissä kohteissa kohteen lämmitysjärjestelmän päästöt ovat kaukolämpöön liitettyjä kohteita hieman suuremmat kuitenkin päästöjen prosentuaalisen osuuden pysyessä kuvissa 14 ja 15 esitettyjen prosentiosuuksia vastaavina. Maalämpöön liitetyissä kohteissa, jossa on myös aurinkosähköjärjestelmä, ovat sekä sähkönjakelun että lämmitysjärjestelmän päästöt perusskenaarioita hieman suuremmat prosentuaalisen osuuden pysyessä aikaisempia esitettyjä vastaavina.



Kuva 15. Korjausrakentamisen tuotevaiheen A1-A3 hiilidioksidipäästöjen jakautuminen eri rakennusosille

Korjausrakentamisen tuotevaiheen A1-A3 materiaalien aiheuttamista päästöistä yli puolet syntyvät tilapintojen sekä tilan jako-osien aiheuttamista päästöistä. Uudisrakentamisen koko tuote- ja rakentamisvaiheesta A1-A5 materiaalivaiheen A1-A3 osuus on noin 92 % jyvitetyn päästön 7,22 kgCO₂e/m²/a. Tuotteiden kuljetuksen (A4) osuus tuote- ja rakentamisvaiheesta on noin 3 % luokkaa kaikissa uudisrakentamisen skenaarioissa päästöillä 0,24 kgCO₂e/m²/a. Rakentamisvaihe (A5) kattaa moduulin A1-A5 osuudesta noin 5 % uudisrakentamisen skenaarioissa. Korjausrakentamisen skenaarioissa materiaalien raaka-aineiden hankinta, niiden kuljetus ja materiaalien valmistus (A1-A3) kattaa korjausrakentamisen skenaarioiden tuote- ja rakentamisvaiheesta noin 94 % jyvitettyillä päästöillä 2,4 kgCO₂e/m²/a. Korjausrakentamisen skenaarioiden kuljetusvaiheen (A4) päästöt ovat noin 0,006 kgCO₂e/m²/a (0,3 % osuus koko A1-A5 moduulista) ja työmaa-vaiheen päästöt noin 0,16 kgCO₂e/m²/a (6 %). Skenaarioissa, joihin asennetaan aurinkopaneelijärjestelmä, on tuotevaiheen päästöt muita skenaarioita hieman korkeammat.

5.2 Laskennan tulosten analysointi

Kuvassa 13 ja taulukossa 7 esitetyistä tuloksista havaitaan, että tarkastellessa koko elinkaaren aikaista hiilijalanjälkeä, ovat kaikki korjausrakentamisen skenaariot purkavan uudisrakentamisen skenaarioita koko elinkaaren ajalta vähäpäästöisempiä. Purkavan uudisrakentamisen skenaarioista vähäpäästöisin on skenaario 1B, jossa rakennus on liitetty maalämpöön. Korjausrakentamisen skenaarioista sekä samalla kaikista simuloitavista skenaarioista vähäpäästöisin on skenaario 2B, jossa olemassa oleva rakennus korjataan ja liitetään samalla maalämpöön. Päästöiltään suurimman korjausrakentamisen skenaarion (skenaario 2A) hiilijalanjälki on noin 10 % vähäpäästöisimmän uudisrakentamisen skenaarion (skenaario 1B) hiilijalanjälkeä pienempi. Kohteeseen suunniteltujen korjaustoimenpiteitä ennen tapahtuvien olemassa olevien rakennusosien ja materiaalien purun osuus koko rakennuksen purusta on noin 20 %. Koska koko rakennuksen purun osuus koko kohteen hiilijalanjäljestä on saaduissa tuloksissa maksimissaan 4 % ja korjaustoimenpiteiden yhteydessä noin 1 %, voidaan olettaa, ettei korjaustoimenpiteitä edeltävän purun laajuudella ole merkittävää vaikutusta rakennuksen elinkaaren hiilijalanjälkeen.

Kohteeseen suunniteltujen korjaustoimenpiteitä ennen tapahtuvien olemassa olevien rakennusosien ja materiaalien purun päästöjen osuus koko rakennuksen purun päästöistä on noin 21 %. Koska koko rakennuksen purun osuus koko kohteen hiilijalanjäljestä on saaduissa tuloksissa maksimissaan 4 % ja korjaustoimenpiteiden yhteydessä noin 1 %, voidaan olettaa, ettei korjaustoimenpiteitä edeltävän purun laajuudella ole merkittävää vaikutusta rakennuksen elinkaaren hiilijalanjälkeen. Purkamisen osuus tuote- ja rakentamisvaiheesta (A0-A5) on uudisrakentamisen skenaarioissa noin 6 % ja korjausrakentamisen skenaarioissa noin 4 %. Saadut tulokset vastaavat Huuhka et al. (2021) suorittaman tutkimusten tulosta, jossa olemassa olevan rakennuksen purkaminen vastasi alle kymmenystä tuote- ja rakentamisvaiheen hiilijalanjälkeä. Tutkimuksessa saatu osuus koko elinkaaren hiilijalanjäljestä oli noin neljä prosenttia, kuten tässäkin tutkimuksessa saadussa tuloksessa.

Skenaarion 1A, eli tavallisen purkavan uudisrakentamisen tuote- ja rakentamisvaiheen (A1-A5) aiheuttama hiilipiikki ilman purkamisen osuutta on koko elinkaaren hiilijalanjäljestä noin 54 %. Hiilipiikistä suurin osa (92 %) koostuu materiaalivaiheen (A1-A3) aiheuttamista päästöistä, kun rakentamisen osuus on noin 5 % ja kuljetusten osuus on noin 3 %. Hiilipiikin jakautuminen materiaalien ja rakentamisen moduuleille vastaa Säynäjoen et al. (2011) saamia tuloksia. Skenaarion 2, eli tavallisen korjausrakentamisen skenaarion tuote- ja rakentamisvaiheen (A1-A5) hiilipiikin osuus skenaarion hiilijalanjäljestä on

noin 23 %. Korjausrakentamisen skenaarion hiilipiikistä noin 94 % muodostuu materiaa-
livaiheen (A1-A3) osuudesta, noin 6 % rakentamisvaiheen (A5) osuudesta ja noin 0,3 %
kuljetusten osuudesta. Kuljetusten pieni osuus selittyy sillä, että paljon kuljetuksia vaati-
via, esimerkiksi rungon betonointitöitä, ei korjausrakentamisen skenaarioissa suoriteta.
Vertailtaessa perusskenaarioiden, eli purkavan uudisrakentamisen ja korjausrakentami-
sen hiilipiikkejä, havaitaan että korjausrakentamisen hiilipiikki on noin 67 % pienempi
kuin uudisrakentamisen hiilipiikki. Huuhka et al. (2021) arvioivat tutkimuksessaan, että
normaalin peruskorjauksen hiilipiikki on noin 70 % uudisrakentamisen hiilipiikkiä pie-
nempi, jolloin tutkimuksessa saadut tulokset vastaavat aikaisempia tutkimustuloksia.
Huuhka et al. arvioivat tutkimuksissaan, että korjauskohteessa, jossa suoritetaan mer-
kittäviä käyttötarkoituksen muutoksia tai laajennuksia, on korjaamisen hiilipiikki huomati-
tavasti suurempi, jolloin sen osuus uudisrakentamisen hiilipiikistä voi olla noin 30 %.

Laskentatyökaluna käytetty One Click LCA ilmoittaa laskennan tulosten yhteydessä las-
kennassa tarkasteltavan rakennuksen ilmaston lämpenemiseen eniten vaikuttavat ma-
teriaalit tai rakenteet. Laskentaohjelma ilmoittaa myös kyseisen materiaalin tuotevaiheen
(A1-A3) ympäristövaikutukset sekä materiaalin ympäristövaikutuksen osuuden koko tuo-
tevaiheen hiilijalanjäljestä. Uudis- ja korjausrakentamisen skenaarioiden viisi eniten il-
maston lämpenemiseen vaikuttavat materiaalit on esitetty taulukossa 8. Kaikissa uudis-
rakentamisen skenaarioissa havaittiin olevan samat eniten ilmaston lämpenemiseen vai-
kuttavat materiaalit kuten korjausrakentamisen skenaarioissa myös.

Taulukko 8. *Laskennassa tarkasteltujen skenaarioiden viisi eniten ilmaston lämpenemiseen vaikuttavat materiaalit ja niiden hiilidioksidipäästöt ja osuudet skenaarion tuotevaiheen A1-A3 pääs- töistä*

	Uudisrakentamisen skenaariot	Korjausrakentamisen skenaariot
<i>Eniten vaikuttava materiaali</i>	Valmisbetoni, normaali lujuus 1 496 tonnia CO ₂ e (31,5 %)	Lasiseinä sisätiloihin 516 tonnia CO ₂ e (32,7 %)
<i>2. eniten vaikuttava materiaali</i>	Ontelolaatta 724 tonnia CO ₂ e (15,3 %)	Toimistotilojen T-lista alakatto 237 tonnia CO ₂ e (15,0 %)
<i>3. eniten vaikuttava materiaali</i>	Lasiseinä sisätiloihin 516 tonnia CO ₂ e (10,9 %)	Ilmanvaihtojärjestelmä toimisto- tai sairaalarakennukselle 192 tonnia CO ₂ e (12,2 %)
<i>4. eniten vaikuttava materiaali</i>	Ilmanvaihtojärjestelmä toimisto- tai sairaalarakennukselle 350 tonnia CO ₂ e (7,4 %)	Sähköjärjestelmä, kaapelointi ja keskus 146 tonnia CO ₂ e (9,2 %)
<i>5. eniten vaikuttava materiaali</i>	Sähköjärjestelmä, kaapelointi ja keskus 265 tonnia CO ₂ e (5,6 %)	Toimistotilojen kokolattiamatto 84 tonnia CO ₂ e (5,3 %)

Tuloksista havaitaan, että uudisrakentamisen kaksi eniten ilmastonlämpenemiseen vai-
kuttavaa materiaalia liittyvät runkorakenteisiin. Tämä huomio tukee laskennassa saatuja
tuloksia, että kolmas osa uudisrakentamisen A1-A3 vaiheen päästöistä muodostuu

runko-, julkisivu-, perustus- ja ulkotasorakenteista. Myös runkorakenteiden sekä betonin päästöjen osuus vastaa esim. Säynäjoen et al. (2011) sekä Ruuska & Häkkinen (2013) saamia tuloksia. Uudis- sekä korjausrakentamisen skenaariossa lasiseinät aiheuttavat yhtä suuret päästöt siitä johtuen, että korjausrakentamisen skenaarioon kaikki lasiseinät on merkitty uusittavaksi.

Huuhka et al. (2021) tutkimuksessa esitettiin, että korjausrakentamisessa saavutetulla energiatehokkuudella on merkittävä vaikutus korjatun kohteen hiilijalanjälkeen sekä hiilijalanjäljen suuruuteen verrattuna uudisrakentamisen hiilijalanjälkeen. Tutkimuksessa esitettiin, että toteutusvaihtoehdossa, jossa saavutetaan uudisrakentamisen tasoinen tai parempi energiatehokkuus, on korjausrakentaminen vähäpäästöisempi toteutusratkaisu. Toisaalta, jos korjausrakentamisessa saavutettu vuosittainen energiankulutuksen taso on korkeampi, korjausrakentaminen ei ole vähäpäästöisempi ratkaisu, vaan korjausrakentamisen hiilijalanjälki saavuttaa uudisrakentamisen hiilijalanjäljen noin 20–30 vuoden päästä elinkaaren alusta. Tutkimuksen yhteydessä havaittiin kuitenkin, että kolmanneksessa tarkastelluista tutkimuksista korjausrakentaminen pysyi vähäpäästöisempänä koko laskentajakson aikana, vaikka korjausrakentamisen energiankulutus oli uudisrakentamista korkeampaa. Huuhka et al. (2021) tutkimuksessa esitettyä korjausrakentamisen vertaavuutta uudisrakentamiseen (kuva 4) on tarkasteltu tarkemmin suoritettujen skenaarioiden tarkastelun yhteydessä kuvissa 11 ja 12. Suoritettussa laskennassa simuloituissa kaikissa korjausrakentamisen skenaariossa, skenaarioiden energiankulutuksen taso oli kaikkia uudisrakentamisen skenaarioita korkeampaa. Siitä huolimatta 50 vuoden laskentajaksolla yhdelläkään korjausrakentamisen skenaariolla ei ollut uudisrakentamista suurempaa elinkaaren hiilijalanjälkeä.

Kuvassa 12 esitetyille suorille laskettiin kulmakertoimet, joiden avulla voidaan tarkastella funktion kasvunopeutta. Skenaarioiden 1A ja 2A suorien kulmakertoimia havaitaan, että oletusten mukaisesti tuote- ja rakentamisvaiheen aikana uudisrakentamisen funktiolla on huomattavasti suurempi kulmakerroin. Kuitenkin tarkastellessa käyttövaiheen kulmakertoimia havaitaan, että korjausrakentamisen kulmakerroin on lähes 40 % uudisrakentamisen kulmakerrointa suurempi. Tämä viittaa siihen, että käyttöiän jatkuessa tarpeeksi pitkään, saavuttaisi korjausrakentamisen hiilijalanjälki uudisrakentamisen hiilijalanjäljen tulevaisuudessa. Tässä työssä tarkastelluissa skenaarioissa 50 vuoden laskentajaksolla mikään korjausrakentamisen skenaarioista ei kuitenkaan saavuta uudisrakentamisen hiilijalanjälkeä.

Sekä luvussa 3.4 että 3.5 tarkasteltiin tilojen käytön ja sen tehokkuuden vaikutusta kohteen energiankulutukseen ja elinkaaren aikaisiin päästöihin. Laskennan kohteena ole-

vasta rakennuksesta ei ollut saatavilla tarkkoja arvioita tilojen tehokkuudesta, joten korjauksen ja uudisrakentamisen yhteydessä parantuneen tilatehokkuuden vaikutusta päästöihin voidaan tarkastella esimerkiksi valtion toimitilastrategian asettamien tilatehokkuuden maksimiarvojen avulla. Vuonna 2014 asetetussa strategiassa peruskorjauksen yhteydessä tilatehokkuuden arvo on maksimissaan 18 m²/hlö(työvuosi) ja uudisrakentamisen yhteydessä maksimissaan 15 m²/hlö(työvuosi). (Valtiovarainministeriö 2014 s. 39) Toimitilastrategiaa on uudistuksessa työn kirjoitushetkellä ja lausuntokierroksella olevassa strategiassa muuttuneen työskentely-ympäristön sekä etätyöskentelyn lisääntyä, on strategiaehdotuksessa uusi tilatehokkuustavoite 10 m²/hlö(työvuotta).

Taulukko 9. *Tilatehokkuustavoitteen vaikutus purkavan uudisrakentamisen ja peruskorjauksen elinkaari-päästöihin per työntekijä*

Skenaario	Perus korjaus (2A)	Uudisrakentaminen (1A)	Uudisrakentaminen (1A), erittäin tehokas tilankäyttö
Tilatehokkuustavoite	18 m ² /hlö	15 m ² /hlö	10 m ² /hlö
Päästöt lämmitettyä netto-alaa kohden vuodessa	10,99 kgCO ₂ e/m ² /a	14,20 kgCO ₂ e/m ² /a	14,20kgCO ₂ e/m ² /a
Päästöt per työntekijä vuodessa	197,82 kgCO ₂ e/hlö/a	213 kgCO ₂ e/hlö/a	142 kgCO ₂ e/hlö/a

Päästöjen tarkastelu tilatehokkuuden kautta perustuu ajatukseen, että kiinteistön tilojen tehokkaammalla käytöllä mahdollistetaan tilatarpeen poistuma muualta, jolloin uusia tiloja ym. ei tarvitse rakentaa. Tähän ajatukseen perustuen voidaan uudisrakentamista pitää vähäpäästöisempänä ratkaisuna, kun sen tilojen käyttö (yks. m²/hlö) on tarpeeksi tehokasta tilanteessa, jossa peruskorjauksella ei päästä samaan tilatehokkuuteen, vaikka peruskorjauksen elinkaari-päästöt olisivatkin uudisrakentamista pienemmät. Laskennan kohteena oleva tavallisen purkavan uudisrakentamisen skenaario on peruskorjauksen skenaariota vähäpäästöisempi, kun tilatehokkuus on alle 13,9 m²/hlö.

Korjausrakentamisen skenaarioissa materiaalien osuus on kaukolämmöllä lämmitetyissä kohteissa noin viides osan ja maalämmöllä lämmitetyissä kohteissa noin kolmas osan. Energian kulutuksen eli moduulin B6 osuus kaukolämpöön liitetyillä kohteilla on lähes 70 % ja maalämpöön liitetyillä kohteilla noin puolet. Uudisrakentamisen skenaarioissa energian käytön osuus on kaukolämmityksessä kohteissa hieman alle 40 %. Uudisrakentamisen maalämpöskenaarioissa energiankäytön osuus on noin viides osa koko elinkaaren hiilijalanjäljestä. Suurin käyttövaiheen (B1-B7) ja energiankäytön (B6) hiilijalanjälki on skenaariolla 2A, eli kaukolämpöön liitetyillä peruskorjauksen skenaariolla. Huuhka et al. (2021) arvioivat tutkimuksessaan, että verrattaessa peruskorjattua (ja korotettua) kaukolämpöön liitettyä rakennusta maalämpöön liitettyyn uudisrakennukseen,

on uudisrakennuksen käyttövaiheessa syntyvät päästöt jopa 70 % peruskorjattua rakennuksen käyttövaiheen päästöjä pienemmät. Tarkasteltaessa tämän työn laskennassa saatuja tuloksia verraten maalämpöön liitettyä uudisrakennusta peruskorjauksen skenaarioon, havaitaan että uudisrakennuksen käyttövaiheen päästöt ovat noin 57 % pienemmät. Huuhkan et al. tutkimuksessa peruskorjattua kohdetta laajennettiin korjaustoimenpiteiden yhteydessä, mikä voi selittää aikaisemmassa tutkimuksessa saadun eron. Kuitenkin tämän työn laskennassa saatu ero käyttövaiheen päästöissä on huomattava. Kuvasta 12 nähdään, ettei energiatehokkuuden tasolla ole vaikutusta tuote- ja rakentamisvaiheen päästöihin, jolloin eri E-luvun omaavien uudisrakennusten tuote- ja rakentamisvaiheen hiilipiikki on sama eri uudisrakentamisen skenaarioilla. Sama huomio voidaan tehdä korjausrakentamisen skenaarioiden yhtenevästä hiilipiikistä. Huomio vastaa Huuhka et al. (2021 s. 25) tutkimuksessaan tekemää huomiota, ettei energiatehokkuuden taso vaikuta merkittävästi tuote- ja rakentamisvaiheen hiilipiikkiin.

Tarkastellessa päästöjen jakautumista rakennuksen osien, rakenteiden ja materiaalien sekä energian ja veden käytön välillä (kuva 13), havaitaan että korjausrakentamisen skenaarioiden rakennuksen ulkopuolisten rakenteiden hiilijalanjälki on odotetusti uudisrakentamista merkittävästi pienempi. Tavallisen korjausrakentamisen skenaarion (skenaario 2A) ulkopuolisten rakenteiden hiilijalanjälki on tavallisen uudisrakentamisen skenaarion (skenaario 1A) ulkopuolisten rakenteiden hiilijalanjäljestä noin 13 %. Korjausrakentamisen ulkopuolisten rakenteiden hiilijalanjäljestä 38 % koostui runkoon kohdistuvien toimenpiteiden päästöistä ja 43 % julkisivuihin kohdistuneiden toimenpiteiden päästöistä. Rungon osuutta ulkopuolisten rakenteiden hiilijalanjäljestä kasvattaa kohteessa uusittavat hissit, jotka on merkitty laskentaohjelmaan runkorakenteina toisen kuvaavamman rakennusosaluokan puuttuessa. Korjausrakentamisen skenaarioissa runkorakenteiden päästöt syntyvät pääosin elinkaaren lopun (C1-C4) ympäristövaikutuksista. Korjaustoimenpiteiden yhteydessä kaikkiin julkisivurakenteisiin, pois lukien ulkoseinäelementit ja ulko-ovet, kohdistettiin joitain korjaus- ja uudistustoimenpiteitä. Korjaustoimenpiteiden yhteydessä kohteen sisäpuolen ei kantavista rakenteista lähes kaikki oli määrätty purettavaksi ja osittain uusittavaksi. Lisäksi kaikkiin skenaarioihin mallinnettiin lähes identtiset sisäpuolen materiaali- ja rakenneratkaisut. Uudis- ja korjausrakentamisen skenaarioissa on tämän vuoksi lähes yhtä suuri sisäpuolen rakenteiden hiilijalanjälki.

Talotekniikan järjestelmien osuus sekä niiden hiilijalanjälki on korjausrakentamisessa noin puolet uudisrakentamisen talotekniikkajärjestelmien hiilijalanjäljestä. Osuus vastaa olettaa, jossa laskentaa suoritettaessa laskentaohjelmaan arvioitiin korjausten yhteydessä säilytettävien taloteknisten järjestelmien osuuden olevan 45 % kaikista järjestel-

mistä. Taloteknisten järjestelmien osuuden ollessa vain noin kymmenes osan (skenaariossa 2 noin 5 %), ei taloteknisten järjestelmien säilytettävien osien määrällä ole merkittävää vaikutusta koko elinkaaren hiilijalanjäljen suuruuteen. Jos tavallisen korjausrakentamisen skenaarioissa kaikki talotekniikkajärjestelmät uusittaisiin korjaustoimenpiteiden yhteydessä, kasvaisi koko elinkaaren hiilijalanjälki noin 6 %. Kuitenkin, jos kaikki talotekniikka järjestelmät vaihdettaisiin ja järjestelmien uusimisen myötä korjausrakentamisen energiankulutuksen taso laskisi uudisrakentamisen skenaarioiden tasolle, pienenesi korjausrakentamisen skenaarion koko elinkaaren hiilijalanjälki 13 %.

Simuloiduista skenaarioista skenaariolla 1C, jossa uudiskohteeseen asennetaan aurinkopaneelit, on suurin elinkaaren aikainen hiilijalanjälki. Tarkastellessa tarkemmin taulukossa 7 esitettyjä tuloksia, havaitaan että verrattuna skenaarioon 1A, skenaariolla 1C on hieman suurempi ($0,037 \cdot 10^6$ kgCO_{2e}) tuotevaiheen A1-A5 hiilijalanjälki. Käyttövaiheen B1-B7 hiilijalanjälki on hieman pienempi ($0,035 \cdot 10^6$ kgCO_{2e}) verrattuna skenaarioon 1A. Tästä voidaan olettaa, että tutkimuksessa mallinnettu aurinkosähköjärjestelmä ei tuo riittävää päästövähennystä verrattuna purkavaan uudisrakentamiseen, johon ei ole liitetty aurinkosähköjärjestelmää. Tuloksessa on kuitenkin otettava huomioon, että aurinkopaneelijärjestelmän mitoitus on suoritettu hyvin karkealla tasolla. Tuloksista voidaan olettaa, että kohteeseen asennettava suurempi tehoinen aurinkosähköjärjestelmä laskisi käyttövaiheen hiilijalanjälkeä energiankulutuksen vähentyessä. Kuitenkin aurinkosähköjärjestelmän koon ja mahdollisesti paneelien pinta-alan kasvaessa, kasvaisi myös tuotevaiheen hiilijalanjälki. Jos oletettu auringosta saatava säteilyteho on noin 1 000 kWh/m², voi yksi 300 W-tehoinen aurinkopaneeli tuottaa 300 kWh sähköä vuodessa. Yhden neliömetrin aurinkopaneelin tuotevaihe (A1-A3) aiheuttaa rakentamisen päästötietokannan (CO₂data.fi) mukaan noin 91 kgCO_{2e} päästöt. Näin ollen yhden paneelin asentaminen aiheuttaa hiilipiikkiin jokaista asennettua aurinkopaneelin neliometriä kohden 91 kgCO_{2e} päästöjä, mutta vähentää vuosittain sähköenergian tarvetta 300 kWh. Päästötietokannan mukaan yhden kWh:n sähkönkulutus aiheuttaa vuoden 2020 tilastoarvon mukaan 0,153 kgCO_{2e} päästöt. Näin ollen yhden neliömetrin aurinkopaneelien asennus pienentää vuosittain käyttövaiheen hiilijalanjälkeä 45,9 kgCO_{2e} käyttövaiheen energiankulutuksen vähenemän myötä verrattuna skenaarioon, jossa aurinkopaneeleja ei asenneta. Näin ollen, tuotevaiheen hiilipiikin kasvaminen on kompensoitu kolmannen käyttövuoden aikana.

5.3 Tulosten luotettavuuden ja merkittävyyden arviointi

Tuloksia tarkastellessa ja arvioitaessa on huomioitava, että työn tavoitteena ei ollut selvittää purkavan uudis- ja korjausrakentamisen konkreettista elinkaaren hiilijalanjälkeä,

vaan työn tavoitteena oli tarkastella vertailevasti purkavan uudisrakentamisen sekä korjausrakentamisen koko elinkaaren hiilijalanjälkeä sekä päästöjen jakautumista elinkaaren eri vaiheille. Laskentaa suoritettaessa sekä uudis- ja korjausrakentamisen tulosten vertailtavuuden varmistamiseksi, skenaarioita muodostettaessa sekä niitä simuloitaessa laskentaan tehtiin useita oletuksia, joilla on merkittävää vaikutusta yksittäisten skenaarioiden laskennan tuloksena saatuun hiilijalanjäljen suuruuteen. Samat oletukset on kuitenkin tehty kaikkiin tarkasteltuihin skenaarioihin, jolloin tulosten vertautuvuus varmistetaan. Kuitenkin tehdyillä oletuksilla sekä rajauksilla on vaikutusta saatuun yksittäisen skenaarion laskennassa saatuun elinkaaren hiilijalanjälkeen.

Tässä työssä saatuihin tuloksiin vaikutti merkittävästi olemassa olevien lähtötietojen puutteellisuus, jonka seurauksena laskentaa suoritettaessa jouduttiin tekemään useita oletuksia ja rajauksia laskentaan. Oletuksia ja rajauksia tehdessä jouduttiin lähtötietoina käyttämään useita eri lähteitä, joiden pohjalta tehtyjen johtopäätösten perusteella laskentaan määritettiin parametrit. Rajauksia ja oletuksia tehdessä keskeisimmät lähtötiedot koostettiin seuraavista tietolähteistä: One Click LCA:n Carbon Designer-työkalun tekemät oletukset liittyen laskentaohjelman tietokannassa olemassa oleviin rakennustyyppeihin perustuviin oletusarvoihin sekä Carbon Designer-työkalun muodostamiin rakennusosien ja materiaalien pinta-ala- ja määräärvioihin. Tämän lisäksi keskeisimpinä lähtötietoina toimivat olemassa olevasta rakennuksesta saatavilla olevat kuntotutkimus- ja energiakatselmusraportit sekä korjaustoimenpiteiden kuvaukset ja määräluettelot. Tiedon puutteet koskivat erityisesti olemassa olevien rakenteiden määrää sekä kohteen nykyisen ja tulevan energiankulutuksen tasoa.

Tarkasteltavien skenaarioiden energiankulutuksen tasot perustuvat ainoastaan yleisiin arvioihin samankokoisten toimistorakennusten ilmoitettuihin kulutustasoihin, eivätkä vastaa todellista kulutusta. Energiankulutuksen arviot sekä uudis- että korjausrakentamisessa on pyritty tekemään niin, että ne ovat vertailtavissa toisiinsa eivätkä näin ollen yksinään tarkastellessa anna suoraa vastausta tarkastellun rakennuksen energiankulutuksesta. Rakennusten energiatehokkuutta tarkastelevissa tutkimuksissa on havaittu, että uudisrakentamisessa voi olla korjausrakentamista suurempi sähkönkulutus tilatehokkuuden ja käytös sekä tehokkaampien talotekniikkajärjestelmien lisätessä kohteen energiankulutusta. Tässä työssä tarkasteltujen uudisrakennusten sähkönkulutus on kuitenkin korjausrakentamisen skenaarioita pienempää. Sähkönkulutuksen kasvaessa uudisrakentamisen skenaarioissa kasvaisi myös kohteen energian käytön päästöt. Tämä kasvattaisi uudisrakentamisen skenaarioiden hiilijalanjälkeä sekä käytön aikaisten päästöjen osuutta, mutta ei muuttaisi uudis- ja korjausrakentamisen päästövaikutusten paremmuusjärjestystä.

Kuten kappaleessa 3.4 on esitetty, rakennuksen energiankulutukseen voidaan vaikuttaa useilla eri menetelmillä eikä tässä työssä ole tarkoituksena tarkastella yksittäisen korjaustoimenpiteen tai suunnitteluratkaisun vaikutusta energiankulutuksen kautta käyttövaiheen päästöihin.

Purkavan uudisrakentamisen skenaarioiden simulointi toteutettiin edellä mainittujen lähtötietojen pohjalta alustavaa laskentaa hyödyntäen, kun lähtötietojen saatavuus oli rajattua. Leino (2020) arvioi diplomityössään alustavan, tietomalliin pohjautuvan sekä tarkan laskennan vahvuuksia ja heikkouksia. Työssä todetaan, että alustavassa laskennassa saatu koko elinkaaren hiilijalanjälki vastaa pääosin tarkassa laskennassa saatuja tuloksia. Kuitenkin alustavassa laskennassa saadut materiaalikohtaiset päästöt ovat tarkkaan laskentaan verrattuna pienemmät eikä näin ollen alustavan laskennan materiaalikohtaiset päästöjen suuruudet ole täysin luotettavia. (Leino 2020 ss. 54–55) Laskennassa saattujen tulosten vertautuvuutta aikaisemmissa tutkimuksissa saatuihin tuloksiin on tarkasteltu tarkemmin kappaleessa 6.2.

Laskentaohjelmassa käytetyssä One Click LCA:ssa, tulosten esittämisen yhteydessä laskentaohjelma antaa oman arvionsa laskennan kattavuudelle ja luotettavuudelle. Laskentaohjelma arvioi laskennan kattavuutta ja luotettavuutta arviointimenetelmän vaatimien elementtien löytymistä laskennasta. Tämän lisäksi laskentaohjelma arvioi toteutuneiden ympäristövaikutusten luotettavuutta vertaamalla saatuja arvoja laskentaohjelmassa oleviin keskimääräisiin arvoihin. Kaikissa skenaarioissa laskentaohjelma antoi tulosten luotettavuudelle parhaan mahdollisen arvosanan.

Mahdollisia virheitä laskennassa on voinut aiheuttaa laskentaohjelmaan materiaalien määrien yhteydessä suoritettavat yksikkömuunnokset. Rakennuksen julkisivun pinta-ala ja julkisivussa olevien ikkunoiden määrä ja pinta-ala jouduttiin arvioimaan erikseen, kun ohjelma ei tunnista muita rakennuksen muotoja kuin suorakulmion. Toisaalta laskentaohjelmaan tehtyjen oletusten ja materiaalien määrät ja pinta-alat ovat kaikissa skenaarioissa yhtenevät, jolloin poikkeamilla ei ole vaikutusta vertailevaan tutkimukseen.

Mahdollisia virheitä laskennassa voi syntyä esimerkiksi manuaalisen näppäily seurauksena, jolloin virheet materiaalien määrien syöttämisessä laskentaohjelmaan tai säilytettyjen materiaalien määrän merkinnässä voivat pienentää tai kasvattaa tarkasteltavan skenaarion hiilijalanjälkeä. Edellä mainittuja inhimillisiä virheitä pyrittiin etsimään laskennasta vertaamalla eri skenaarioiden laskentatuloksia, jonka avulla pyrittiin tunnistamaan laskennasta unohdettuja tai väärin kirjattuja merkintöjä. Laskentaa suoritettaessa hyödynnettiin myös laskentaohjelmassa olevaa mahdollisuutta kopioida suunnitelmia, jotta

eri skenaarioista saatiin mahdollisimman identtisiä tarvittavilta osilta. Suunnitelmien kopiaaminen mahdollisti myös tulosten vertautuvuuden eri skenaarioiden välillä.

Laskennassa hyödynnetty laskentaohjelma soveltuu hyvin uudisrakentamisen elinkaariarviointiin, mutta korjausrakentamisen arvioinnissa laskentaohjelman käyttö koettiin haastavaksi erityisesti Ympäristöministeriön arviointimenetelmää sovellettaessa, ei laskentaohjelma soveltunut täysin, jonka seurauksena arviointimenetelmä jouduttiin vaihtamaan Ympäristöministeriön arviointimenetelmästä Level(s)-arviointimenetelmään. Arviointimenetelmän muutos voi vaikuttaa yksittäisen skenaarion hiilijalanjäljen suuruuteen, mutta arviointimenetelmän vaihtuessa, kaikkien skenaarioiden tulokset muuttuvat samassa suhteessa, jolloin vertailevaan analyysiin arviointimenetelmän vaihdolla ole merkitystä.

6. JOHTOPÄÄTÖKSET JA JATKOTUTKIMUS

6.1 Johtopäätökset

Tämän diplomityön tavoitteena oli tarkastella korjausrakentamisen päästövaikutusta verrattuna uudisrakentamiseen koko rakennuksen elinkaaren ajalta. Tutkimuksessa tarkasteltiin sekä kvantitatiivisesti että kvalitatiivisesti uudis- ja korjausrakentamisen elinkaaren hiilijalanjälkeen vaikuttavia tekijöitä, joiden pohjalta muodostettiin käsitys merkittävimmin eri toteutusten elinkaaren aikaisiin hiilidioksidipäästöihin vaikuttavista tekijöistä sekä päästövaikutusten jakautumisesta elinkaaren eri vaiheille. Työn teoreettinen pohja muodostettiin aikaisempien tutkimusten pohjalta ja tutkimuksen laskennallinen osuus, eli eri toteutusten hiilijalanjäljen laskenta suoritettiin One Click LCA -laskentaohjelman avulla. Työssä tarkasteltiin tavallisen purkavan uudisrakentamisen ja korjausrakentamisen lisäksi tarkasteltavan toteutuksen liittämisen sekä aurinkopaneelien asennuksen päästövaikutusta. Uudis- sekä korjausrakentamista edeltävä olemassa olevan rakennuksen tai sen osien purku otettiin laskennassa huomioon.

Tarkasteltaessa koko elinkaaren aikaisia päästöjä, ei ole yksiselitteistä vastausta mikä on korjausrakentamisen päästövaikutus verrattuna uudisrakentamiseen. Tutkimuksessa havaittiin, että korjaus- sekä uudisrakentamisen päästövaikutuksiin vaikuttaa merkittävästi saavutettu energiatehokkuus, kohteen rakenneratkaisut ja materiaalit sekä tilojen käytön tehokkuus ja käyttöaste. Uudisrakentaminen on jo hyvin pitkälle säänneltyä ja esimerkiksi kohteen energiatehokkuuden tasoa ohjataan säännellyillä tavoitetasoilla. Lisäksi purkavassa uudisrakentamisessa kohteen suunnittelu on vapaampaa verrattuna korjausrakentamiseen, jossa esimerkiksi kantavien rakenteiden, huonekorkeuden ja kiinteiden tilajako-osien sijainnit sekä olemassa olevien rakenteiden ja materiaalien rakenteelliset ominaisuudet ohjaavat sekä mahdollisesti rajoittavat suunnittelua ja kohteeseen toteutettavia ratkaisuja.

Merkittävimmin eroja purkavan uudisrakentamisen ja -korjausrakentamisen koko elinkaaren aikaisista päästövaikutuksista loivat korjaushankkeissa saavutettu energiatehokkuuden taso, korjaustoimenpiteiden laajuus ja korjausaste sekä korjausrakentamisen yhteydessä saavutettu tilankäytön tehokkuus ja käyttöaste. Riippuen edellä mainittujen parametrien saavutetusta tasosta sekä niiden vertautumisesta uudisrakentamisessa saavutettuun tasoon, voi korjausrakentaminen olla elinkaaripäästöiltään suurempaa tai pienempää. Tässä tutkimuksessa tarkastellun case-kohteen ja eri toteutusratkaisujen poh-

jalta tuloksena saatiin, että korjausrakentaminen on kaikissa tilanteissa uudisrakentamista vähäpäästöisempää. Tähän tulokseen vaikuttaa merkittävimmin laskennassa käytetyt energiankulutuksen tilastoarvoihin pohjautuvat arviokulutukset sekä korjausrakentamisen korjaustoimenpiteiden laajuus. Tutkimuksen tuloksia tarkastellessa ja arvioitaessa on kuitenkin huomioitava, että kestävä ja vastuullinen rakentaminen ei ole ainoastaan toteutukseltaan vähäpäästöisintä. Kestävä rakentaminen ottaa huomioon myös rakentamisen sosiaaliset sekä taloudelliset vaikutukset. Näin ollen vertailevassa tarkastelussa tulisi kiinnittää huomiota myös toteutettavan ratkaisun kustannuksiin sekä sen taloudellisiin vaikutuksiin läpi elinkaaren.

Tarkasteltaessa purkavan uudisrakentamisen sekä korjausrakentamisen hiilijalanjäljen jakautumista elinkaaren eri vaiheille, havaittiin uudisrakentamisen päästöjen merkittävän osan, useimmissa tapauksissa yli puolen, koostuvan tuotevaiheen (A1-A3) aikana syntyvistä päästöistä. Raaka-aineiden hankinnasta ja materiaalien valmistuksesta aiheutuva hiilipiikki aiheuttaa lyhyen aikavälin sisällä merkittävät päästöt ilmastoon, jota voidaan pitää haitallisempana kuin pidemmällä aikavälillä, kuten käytön aikana, syntyvien päästöjä. Korjausrakentamisessa korjaustoimenpiteiden yhteydessä uusittavien materiaalien valmistuksesta aiheutuva hiilipiikki oli case-skenaarioissa noin kolmas osan uudisrakentamisen hiilipiikistä. Korjausrakentamisen aiheuttamaan hiilipiikkiin vaikuttaa kuitenkin merkittävästi korjaustoimenpiteiden määrä ja laajuus, jolloin esimerkiksi laajennuksia sekä laajoja tilamuutoksia sisältävien korjausten hiilipiikki voi olla huomattavasti suurempi. Merkittävä osa uudisrakentamisen päästöistä muodostuu runkoon liittyvistä betonirakenteista (perustukset, alapohja ja runkorakenteet), jolloin korjausrakentamisessa näiden säilyessä, jää hiilipiikki oletetusti aina uudisrakentamista pienemmäksi.

Tuotevaiheen lisäksi käytön aikaisella energian käytöllä (B6) on merkittävä osuus rakennuksen elinkaaren aikaisista päästöistä sekä uudis- että korjausrakentamisessa. Korjaushankkeissa energian käytön osuus on puolet tai yli, kun uudisrakentamisessa energian käytön osuus on viidesosan luokkaa riippuen toteutetuista ratkaisuista. Verrattaessa uudis- ja korjausrakentamista, korjausrakentamisella on usein suuremmat energiankäytön päästöt, riippuen toki korjausrakentamisessa saavutetusta energiatehokkuuden tasosta. Jos korjausrakentamisessa saavutettu taso on tarpeeksi saman tasoista tai heikompaa verrattuna uudisrakentamiseen tasoon, ei rakenteiden säilytyksessä saavutetut tuotevaiheen säästöt materiaalipäästöissä riitä kompensoimaan käyttövaiheessa heikommasta energiatehokkuuden tasosta syntyvää päästökertymää. Tällöin korjausrakentaminen voi ohittaa elinkaaren aikaisissa päästöissä uudisrakentamisen, aiheuttaen 50 vuoden tarkastelujaksolla suuremmat päästöt verrattuna uudisrakentamiseen. Tämä

korostaa saavutetun energiatehokkuustason merkittävyyttä kertyvissä päästöissä sekä kasvattaa koko elinkaaren aikaisten päästöjen tarkastelun merkittävyyttä.

Tilojen käyttö sekä käytön tehokkuus on keskeinen tarkasteltava parametri erityisesti toimisto- ja liikerakennuksissa. Käytön seuraaminen sekä sen pohjalta tapahtuva esimerkiksi talotekniikan ohjaus toimii keskeisenä tekijänä energiansäästötoimenpiteissä ja tämän myötä käytön aikaisen hiilijalanjäljen ja käyttökustannusten minimoinnissa. Käytön tehokkuus ja tilojen muuntojoustavuus vaikuttaa osaltaan myös alueelliseen rakennustarpeeseen. Kun esimerkiksi toimistotiloja käytetään mahdollisimman tehokkaasti ja monipuolisesti, tilan tarve muualta vähenee pienentäen samalla tarvetta rakentaa uutta ja tämän myötä pienentää rakentamisen hiilijalanjälkeä. Tilojen tehokas käyttö vaatii tiloilta kuitenkin muuntojoustavuutta, avoimuutta sekä monipuolisen käytön mahdollisuutta. Usein tilojen tehokkaampi käyttö kasvattaa tilojen energiankulutusta, mutta tehokkaampi ja monipuolisempi käyttö minimoi tilantarvetta pienentäen samalla päästöjä. Työntekijäkohtaisesti tarkasteltuna, elinkaaripäästöiltään suurempi uudisrakennus voi olla vuosipäästöiltään pienempi, kun päästöt jyvitetään työntekijää ja työntekijän tarvitsemaa pinta-alaa kohden, jos korjausrakentamisen skenaarioissa ei päästä samaan tilatehokkuustavoitteeseen (m^2 /työntekijä). Sama trendi havaitaan tarkasteltaessa energiatehokkuutta käytön mukaan, jolloin tehokkaammin käytetty tila saattaa vaikuttaa energiatehottomammalta, mutta tarkasteltaessa todellisen käytön mukaan, on tila energiatehokkaampi työntekijää kohden. Keskeinen parametri, joka on huomioitava numeraalisen energia-, päästö- ja kustannustehokkuuden rinnalla on siis myös käytön tehokkuus. Tässä tutkimuksessa tarkastellussa laskennassa korjausrakentamisen tilatehokkuuden ollessa $18 m^2$ /työntekijä ja uudisrakentamisen tilatehokkuuden ollessa alle $13,9 m^2$ /työntekijä, on uudisrakentaminen vähäpäästöisempi ratkaisu.

Vertailtaessa toteutettavaa rakennusta ja sen päästöjä, on huomioitava siis yksittäisten parametrien sijaan kokonaisuus. Vaikka korjausrakentaminen saattaisi vaikuttaa säilytettävien rakenteiden tuoman säästön materiaalipäästöissä, voi korjausrakentamisen toteutettavuus ja toimivuus esimerkiksi käyttäjän näkökulmasta olla heikompaa tasoa verrattuna uudisrakentamiseen. Merkittävimmät haasteet korjausrakentamisen elinkaaripäästöjen hallinnassa verrattuna uudisrakentamiseen on korjausten laajuus ja korjaustoimenpiteiden todellinen toteutettavuus. Keskeisimmin eroa uudis- ja korjausrakentamisen elinkaaripäästöjen välillä luo saavutettu energiatehokkuuden taso ja tehokkuuteen vaikuttavien talo- ja rakennusteknisten ratkaisujen toteutettavuus. Myös esimerkiksi korjaushankkeissa saavutettu todellinen rakenteiden käyttöikä ja tulevat korjaustarpeet on tarkasteltava ja verrattava niitä uudisrakentamiseen huomioiden päästöt, toimenpiteiden

toteutettavuus sekä syntyvät kustannukset. Esimerkiksi korjausrakennuksen rungon säilyvyys korjaushetkestä ei välttämättä ole uudisrakentamisen tasoa. Mahdollisimman pitkä elinkaari kuitenkin saavutetaan suunnitelmallisella korjaus- ja ylläpitosuunnittelulla sekä tilojen toteuttamisella mahdollisimman muuntojoustaviksi käyttäjien tarpeisiin.

Tuloksia tarkasteltaessa ja analysoitaessa on kuitenkin huomioitava, että koko rakennusteollisuus on murrosvaiheessa, jolloin rakentamisen osapuolet omilla tahoillaan tekevät jatkuvasti työtä vähähiilisyystavoitteisiin pääsemisessä. Ympäristöministeriön arviointimenetelmään jo sisällytetty energiantuotannon vähähiilistymisolettama ottaa päätöslaskennassa huomioon energiantuotannon tulevaisuudessa tapahtuvan vähähiilistymisen, joka pienentää suoraan käyttövaiheen päästöjä erityisesti energiatehottomissa korjaushankkeissa. Lisäksi materiaalitoimittajat ja -valmistajat omilla tahoillaan kehittävät vähähiilisempiä materiaaleja sekä rakennusratkaisuja, joka tulee pienentämään erityisesti uudisrakentamisen tuotevaiheen aiheuttamaa hiilipiikkiä. Tutkimuksen case-tarkastelussa ei olettamia huomioitu, eivätkä olettamat oikeuta tekemään kestävästä rakentamisesta vastaisia ratkaisuja.

Vähähiilinen rakentaminen, niin kuin kustannustehokas ja käyttäjäystävällinen rakentaminen, vaatii eri tekijöiden yhteistyötä jo hankkeen varhaisesta vaiheesta lähtien. Parhaan lopputuloksen saamiseksi tulisi päästötarkastelu yhdessä energiatehokkuuden ja kustannustarkastelun kanssa tapahtua läpi rakennushankkeen käyttöön, korjaamiseen ja purkamiseen asti. Tarkastelua tulisi tehdä jatkuvasti suunnitelmien ja eri vaihtoehtojen muodostuessa ja tarkentuessa, jolloin saatava tieto toimii myös suunnittelun, kehityksen, rakentamisen ja käytön sekä purkamisen ohjauksena läpi hankkeen. Kestävää rakentamista ei saavuteta optimoimalla vain yhtä parametria, vaan se syntyy monen tekijän summana kokonaisoptimoinnilla.

6.2 Jatkotutkimusehdotukset

Tutkimus suoritettiin työn tekohetkellä ajankohtaisen tiedon pohjalta diplomityölle ominaisen laajuuden mukaisin rajauksin. Suoritettu tutkimus oli vertaileva katsaus uudis- ja korjausrakentamisen elinkaaren aikaisen hiilijalanjäljen eroihin, mutta ei ottanut kantaa esimerkiksi tuotannon näkökulmaan eri skenaarioiden toteutettavuudesta. Kestävän rakentamisen näkökulmia ovat myös sosiaalinen sekä taloudellinen kestävyys, joita tulisi tarkastella tarkemmin. Korjaus- ja uudisrakentamista tulisi tarkastella tarkemmin päästöoptimoinnin lisäksi kustannustehokkuuden ja esimerkiksi tuotannon aikataulun, materiaalien todellisen käyttöä sekä energiatehokkuuden näkökulmista. Jotkin rakennusalan yritykset omassa toiminnassaan suorittavat kokonaisoptimoinnin tarkasteluja, joissa py-

ritään löytämään Pareto-optimi kustannusten, päästöjen sekä energiatehokkuuden välillä, mutta saatavilla olevien vertailevien tutkimusten määrä korjaus- ja uudisrakentamisen välillä on vähäistä.

Myös käytön ja sen tehokkuuden vaikutuksesta energiankulutukseen, kustannuksiin ja päästöihin löytyy vielä kohtalaisen vähän tietoa ja tutkimuksia. Käyttö ja sen tehokkuus on kuitenkin erityisesti toimisto- ja liikerakennuksien omistajille sekä käyttäjille keskeinen tarkasteltava parametri, joka tässä tutkimuksessa lyhyen tarkastelun seurauksena huomattiin vaikuttavan esitettävään energiankulutukseen ja päästövaikutukseen. Käytön vaikutuksesta päästöihin sekä energiankulutukseen tulisi tarkastella tarkemmin ja siitä saatavaa tietoa voitaisiin hyödyntää kiinteistön käytön sekä suunnittelun ohjaukseen. Korjausrakentamisessa voi olla merkittäviä haasteita tehokkaan käytön mahdollistamiseen, joka voi vaikuttaa esimerkiksi vuokralaisten halukkuuteen vuokrata synnyttävän tilojen vajaakäyttöä.

LÄHTEET

- Ahola R., Liljeström K., (2018). Rakennuksen elinkaaren hiilijalanjäljen pienentäminen kustannustehokkaasti vuokratalokohteessa. ARA. Asumisen rahoitus- ja kehittämiskeskuksen raportteja 08/2018. 73s. Saatavilla: https://joutsenmerkki.fi/wp-content/uploads/2018/12/Hiilijalanj%C3%A4ljen-pienent%C3%A4minen-kustannustehokkaasti_2018.pdf
- Berardi U. (2013). Clarifying the new interpretations of the concept of sustainable building. Sustainable cities and society 2013. Vol 8. 7s. Saatavilla: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scs.2013.01.008>
- Bionova Oy, (2017). Tiekartta rakennuksen elinkaaren hiilijalanjäljen huomioimiseen rakentamisen ohjauksessa. Bionova Oy & Ympäristöministeriö. 72s. Saatavilla: <https://ym.fi/vahahiillisen-rakentamisen-tiekartta>
- One Click LCA Ltd, (2021). One Click Lca -verkkosivu. Saatavilla: <https://www.oneclick-lca.com/fi/>
- co2data.fi, (2021). Rakentamisen päästötietokanta. Saatavilla: <https://co2data.fi/>
- Crawford R., (2011). Life cycle assessment in the built environment. London, Spon Press. 272s. Saatavilla: <https://doi.org/10.4324/9780203868171>
- Dodd N., Donatello S., Codella M., (2021a). Level(s) – A common EU framework of core sustainability indicators for office and residential buildings, User Manual 1: Introduction to the Level(s) common framework (Publication version 1.1). 27s. Saatavilla: <https://susproc.jrc.ec.europa.eu/product-bureau//product-groups/412/documents>
- Dodd N., Donatello S. & Cordella M., (2021b). Level(s) indicator 1.2: Life cycle Global Warming Potential (GWP) user manual: introductory briefing, instructions and guidance (Publication version 1.1). 37s. Saatavilla: <https://susproc.jrc.ec.europa.eu/product-bureau//product-groups/412/documents>
- Green Building Council Suomi, (2013), Rakennusten elinkaarimittarit. 64s. Saatavilla: <https://figbc.fi/elinkaarimittarit/>
- Green Building Council Suomi, (2018). Rakennushankkeiden ympäristöluokitukset Suomessa. 7s. Saatavilla: <https://figbc.fi/julkaisu/rakennushankkeiden-ymparistovaikutukset-suomessa/>

Gelfand L., Duncan C., (2012). Sustainable renovation : Strategies for commercial building systems and envelope. New York: John Wiley & Sons, Incorporated, 2011. 290s.

Hirvonen J., Heljo J., Jokisalo J., Kurvinen A., Saari A., Niemelä T., Sankelo P., Kosonen R., (2021). Emissions and power demand in optimal energy retrofit scenarios of the Finnish building stock by 2050. Sustainable Cities and Society, Vol 70. 22s. Saatavilla: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102896>

HM Treasury, (2013). Infrastructure Carbon Review. Marraskuu 2013. 36s. Saatavilla: <https://www.gov.uk/government/publications/infrastructure-carbon-review>

Huuhka S., Vainio T., Moisio M., Lampinen E., Knuutinen M., Bashmakov S., Köliö A., Lahdensivu J., Ala-Koutila P., Lahdenperä P., (2021). Purkaa vai korjata? : Hiilijalanjälkivaikutukset, elinkaarikustannukset ja ohjauskeinot. Ympäristöministeriön julkaisuja 9/2021. 129s. Saatavilla: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-361-221-1>

Häkkinen T., Ala-Kotila P., (2019). Monikäyttöisyys ja muunneltavuus kestävässä rakentamisessa. VTT Technical Research Centre of Finland. VTT Technology No. 363. Saatavilla: <https://doi.org/10.32040/2242-122X.2019.T363>

Hämäläinen J., (2012). Rakennustyömaan energiatutkimus. Diplomityö, Tampereen yliopisto. 87s. Saatavilla: <https://www.rakennusteollisuus.fi/globalassets/rakentamisen-kehittaminen/rakennustyomaan-energiatutkimus.pdf>

Ilmastolaki 609/2015, (2015). Tullut voimaan 22.5.2015. Saatavilla: <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2015/20150609>

Laki rakennuksen energiatehokkuudesta, 50/2013, (2013). Annettu 18.1.2013. Saatavilla: <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2013/20130050>

Leino R., (2020). Kerrostalon hiilijalanjälki: Päästöjen määrä ja laskenta. Diplomityö, Tampereen yliopisto. 76s. Saatavilla: <http://urn.fi/URN:NBN:fi:tuni-202004243713>

Lucuik M., Huffman A., Trusty W., Prefasi A., (2010). The greenest building is the one that is never built: A life-cycle assessment study of embodied effects for historic buildings. Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings - 11th International Conference. Saatavilla: https://web.ornl.gov/sci/buildings/conf-archive/2010%20B11%20papers/158_Lucuik.pdf

Maankäyttö- ja rakennusasetus 895/1999, (1999). Säädetty 5.2.1999. Saatavilla: <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/1999/19990895>

Maankäyttö- ja rakennuslaki 132/1999, (1999). Tullut voimaan 5.2.1999. Saatavilla: <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/1999/19990132>

Motiva Oy, (2021a). Ominaiskulutukset palvelusektorilla. Sivua päivitetty viimeksi 27.1.2021. Saatavilla: https://www.motiva.fi/ratkaisut/energiakatselmustointa/tem_n_tukemat_energiakatselmukset/tilastotietoa_katselmuksista/ominaiskulutukset_palvelusektorilla

Motiva Oy, (2021b). Pohjakulutukseen perustuva mitoitus. Sivua päivitetty viimeksi 8.5.2020. Saatavilla: https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkosahko/hankinta_ja_asennus/aurinkosahkojarjestelman_mitoitus/mitoitusmenetelmia/pohjakulutukseen_perustuva_mitoitus

Motiva Oy, (2021c). Sähköverkkoon kytketty toimistorakennus – vaihtosähkö -verkkosivu. Sivua päivitetty viimeksi 31.5.2021. Saatavilla: https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkosahko/ennen_jarjestelman_hankintaa/jarjestelman_kannattavuus/sahkoverkkoon_kytetty_toimistorakennus_vaihtosahko

mrluudistus.fi, (2021). Maankäyttö- ja rakennuslaki uudistuu -verkkosivu. Luettu 21.5.2021. Saatavilla: <https://mrluudistus.fi/>

Ojanen T., Nykänen E., Hemmilä K., (2017). Rakenteellinen energiatehokkuus korjausrakentamisessa -opas. Rakennusteollisuus RT, Puuteollisuus, Ympäristöministeriö & VTT. Uusi versio päivitetty 8.5.2017. Saatavilla: <https://www.rakennusteollisuus.fi/Toimialat/Rakennustuoteteollisuus-RTT/Rakennusmateriaalit/rakenteellinen-energiatehokkuus-korjausrakentamisessa--opas/>

Rakennusten energiatehokkuusdirektiivin muutos 2018/844/EU, (2018). https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=uriserv%3AOJ.L_.2018.156.01.0075.01.ENG

Rakennusteollisuus RT, (2020a). Rakennusten hiilijalanjälkitarkastelut. KEKRI – Kestävät kriteerit rakennusten vähähiilisyden arviointiin -loppuraportti. Julkaistu 26.8.2020. Saatavilla: <https://www.rakennusteollisuus.fi/Tietoa-alasta/Ilmasto-ymparisto-ja-energia/hiilijalanjaljen-arviointi/>

Rakennusteollisuus RT, (2020b). Vähähiilinen rakennusteollisuus 2035. Osa 4. Rakennusteollisuuden ja rakennetun ympäristön vähähiilisyden tiekartta 2020 – 2035 - 2050. Lopullinen versio. Gaia Consulting Oy. 42s. Saatavilla: <https://www.rakennusteollisuus.fi/tiekartta>

Rakennusteollisuus RT, (2021a). Tilastot ja suhdanteet -verkkosivu. Luettu 18.5.2021. Saatavilla: <https://www.rakennusteollisuus.fi/Tietoa-alasta/Talous-tilastot-ja-suhdanteet/>

Rakennusteollisuus RT, (2021b). Kestävän rakentamisen standardit luovat yhdenmukaiset pelisäännöt-verkkosivu. Luettu 19.5.2021. Saatavilla: <https://www.rakennusteollisuus.fi/Tietoa-alasta/Ilmasto-ymparisto-ja-energia/Rakentaminen-ja-vaaralliset-aiheet/CENCT-350-Kestava-rakentaminen/>

RT 18-10922, (2008). Kiinteistön tekniset käyttöiät ja kunnossapitajaksot. Rakennustietosäätiö RTS, 2008. Saatavilla RT Tietoväylästä.

Ruuska A., Häkkinen T., (2015). The significance of various factors for GHG emissions of buildings. International Journal of Sustainable Engineering, Vol. 8, Nos. 4-5., 13s. Saatavilla: <https://doi.org/10.1080/19397038.2014.934931>

Saari A., Heikkilä P., (2008). Building Flexibility Management. The Open Construction and Building Technology Journal, 2008, Vol 2. ss. 239–242. 4s.

Sedlák J., Jelínek P., Stránská Z., Struhala K. (2015). Environmental Aspects of Renovations – Case Studies. Energy Procedia. Vol 78. 4s. Saatavilla: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.196>

Sekki T., Airaksinen M., Saari A., (2015). Impact of building usage and occupancy on energy consumption in Finnish daycare and school buildings. Energy and Buildings. Vol 105, pp. 247–257. 11s. Saatavilla: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.07.036>

Sekki T., Andelin M., Airaksinen M., Saari A., (2016). Consideration of energy consumption, energy costs, and space occupancy in Finnish daycare centres and school buildings. Energy and Buildings. Vol 129, pp. 199–206. 8s. Saatavilla: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.08.015>

Sekki T., Airaksinen M., Saari A., (2017). Effect of energy measures on the values of energy efficiency indicators in Finnish daycare and school buildings. Energy and Buildings. Vol 139, pp. 124–132. 9s. Saatavilla: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.01.005>

SFS-EN 15643-1, (2012). Sustainability of construction works. Sustainability assessment of buildings. Part 1: General framework. Vahvistettu 05.03.2012.

SFS-EN 15643-2, (2011). Sustainability of construction works - Assessment of buildings - Part 2: Framework for the assessment of environmental performance. Vahvistettu 05.03.2012.

SFS-EN 15643-4, (2011). Sustainability of construction work – Assessment of buildings – Part 4: Framework for the assessment of economic performance. Vahvistettu 16.4.2012.

sSFS-EN ISO 14040, (2006). Ympäristöasioiden hallinta. Elinkaariarviointi. Periaatteet ja pääpiirteet. Vahvistettu 18.12.2006.

SFS-EN ISO 20887, (2020). Sustainability in buildings and civil engineering works — Design for disassembly and adaptability — Principles, requirements and guidance. Julkaistu tammikuu 2020.

Säynäjoki A., Heinonen J., Junnila S., (2011). Carbon Footprint Assessment of a Residential Development Project. International Journal of Environmental Science and Development, 2011. Vol 2, No. 2. 8s.

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, 2012. Vol 7, No. 3. 10s.

Säynäjoki A., Heinonen J., Junnonen J-M., Junnila S., (2017). Input–output and process LCAs in the building sector: are the results compatible with each other? Carbon Management, 2017. Vol 8., No. 2. 11 s. Saatavilla: <https://doi.org/10.1080/17583004.2017.1309200>

Vares, S., Häkkinen, T., & Shemeikka, J. (2011). Kestävän rakentamisen tavoitteet ja niiden toteutuminen: Espoo Suurpellon päiväkodin arvio. VTT Technical Research Centre of Finland. VTT Tiedotteita - Research Notes No. 2573. Saatavilla: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2011/T2573.pdf>

World Green Building Council, (2019). Bringing embodied carbon upfront. Coordinated action for the building and construction sector to tackle embodied carbon. Worlds Green Building Council:in julkaisuja, syyskuu 2019. Saatavilla: <https://www.worldgbc.org/embodied-carbon>

YIT Oyj, (2021). Kestävä kehitys. Saatavilla: <https://www.yitgroup.com/fi/kestavakehitys>

yit.fi, (2021). Workery+ -verkkosivu. Luettu 9.6.2021. Saatavilla: <https://www.yit.fi/workeryplus>

ym.fi, (2020). Suomen pitkän aikavälin korjausrakentamisen strategia -verkkosivu. Luettu 1.6.2021. Saatavilla: <https://ym.fi/korjausrakentamisen-strategia>

ym.fi, (2021a). ”Rakentamisen päästöjä voidaan nyt vertailla – uusi päästötietokanta luo perustan vähähiilisen rakentamisen säädösohjaukselle” -verkkosivu. Luettu 15.6.2021. Saatavilla: <https://ym.fi/-/rakentamisen-paastoja-voidaan-nyt-vertailla-uusi-paastotietokanta-luo-perustan-vahahiilisen-rakentamisen-saadsohjaukselle>

ym.fi, (2021b). ”Level(s) – rakennusten resurssitehokkuuden yhteiset EU-mittarit” -verkkosivu. Luettu 20.7.2021. Saatavilla: <https://ym.fi/levels-rakennusten-resurssitehokkuuden-mittarit>

Ympäristöministeriö, (2019a). Rakennuksen vähähiilisyyden arviointimenetelmä. Ympäristöministeriön julkaisuja 22/2019. 54s. Saatavilla verkosta: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-361-029-3>

Ympäristöministeriö, (2019b). Johdatus rakennusten elinkaariarviointiin -opas. Ympäristöministeriö. 20s. Saatavilla: <https://elinkaarilaskenta.fi/>

Ympäristöministeriö, (2020). Suomen pitkän aikavälin korjausrakentamisen strategia 2020–2050. Rakennusten energiatehokkuusdirektiivin (2010/31/EU), muutettuna direktiivillä 2018/844/EU, artiklan 2a mukainen ilmoitus. Julkaistu 10.3.2020. Ympäristöministeriö. 82s. Saatavilla: <https://ym.fi/korjausrakentamisen-strategia>

Ympäristöministeriö, (2021). Maankäyttö- ja rakennuslaki -verkkosivu. Luettu 21.5.2021. Saatavilla: <https://ym.fi/maankaytto-ja-rakennuslaki>

Ympäristöministeriön asetus eräiden rakennuksen teknisten järjestelmien energiatehokkuuden vaatimuksista, 718/2020, (2020). Tullut voimaan 1.1.2021. Saatavilla: <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2020/20200718>

Ympäristöministeriön asetus rakennuksen energiatehokkuudesta, 1048/2017, (2017). Tullut voimaan 20.12.2017. Saatavilla: <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2017/20171048>

Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen sisäilmastosta ja ilmanvaihdosta, 1009/2017, (2017). Tullut voimaan 1.1.2018. Saatavilla: <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2017/20171009>

LIITE A: LASKENNASSA TARKASTELTUJEN SKENAARIOIDEN HIILIDIOKSIDIPÄÄSTÖT LÄMMITETTYÄ NETTOALAA KOHDEN VUODESSA ELINKAAREN ERI VAIHEISSA

Yksikkö [kgCO ₂ e/m ² /a]	Purku ennen uutta elin- kaarta	A1- A3	A4	A5	B4- B5	B6	B7	C1- C4	B1	∑ (A1- C4)	∑ (sis. purku)
Skenaario 1A Uudisrakennus (E-luku 82/B)	0,48	7,23	0,24	0,39	0,37	5,42	0,06	0,49	0,00	14,20	14,68
Skenaario 1B Uudisrakennus liittäminen maalämpöön (E-luku 75/A)	0,48	7,24	0,24	0,39	0,38	3,00	0,06	0,49	0,00	11,80	12,27
Skenaario 1C Uudisrakennus aurinkosähkö (E-luku 78/A)	0,48	7,29	0,24	0,39	0,48	5,26	0,06	0,49	0,00	14,21	14,68
Skenaario 1D Uudisrakennus maalämpö ja aurinkosähkö (E-luku 71/A)	0,48	7,30	0,24	0,39	0,49	2,84	0,06	0,49	0,00	11,80	12,28
Skenaario 2A Peruskorjaus (E-luku B/100)	0,10	2,41	0,01	0,16	0,36	7,52	0,06	0,48	0,00	10,99	11,09
Skenaario 2B Peruskorjaus liittäminen maalämpöön (E-luku B/92)	0,10	2,42	0,01	0,16	0,37	3,64	0,06	0,47	0,00	7,13	7,23
Skenaario 2C Peruskorjaus, aurinkosähkö (pohjateho) (E-luku B/93)	0,10	2,46	0,01	0,16	0,47	7,36	0,06	0,48	0,00	10,99	11,09
Skenaario 2D Peruskorjaus maalämpö ja aurinkosähkö (E-luku 88/B)	0,10	2,47	0,01	0,16	0,48	3,48	0,06	0,48	0,00	7,13	7,23