

Antti Harvala

**RAKENNUSHANKKEEN
HIILIJALANJÄLJEN OHJAAMINEN
HANKE- JA
EHDOTUSSUUNNITTELUVAIHEESSA**

Diplomityö
Rakennetun ympäristön tiedekunta
Tarkastaja: Arto Saari
Tarkastaja: Juha Nykänen
Elokuu 2022

TIIVISTELMÄ

Antti Harvala: Rakennushankkeen hiilijalanjäljen ohjaaminen hanke- ja ehdotussuunnitteluvaiheessa

Diplomityö

Tampereen yliopisto

Rakennustekniikan maisterikoulutus

Elokuu 2022

Rakennusten kasvihuonekaasupäästöjä on menneinä vuosikymmeninä pyritty ohjaamaan säännöksillä lähinnä uudis- ja korjausrakennuskohteiden energiatehokkuutta parantamalla. Ohjaus on ollut perusteltua, sillä lämmitykseen käytetyn energian kasvihuonekaasupäästöt ovat olleet valtaosa koko rakennuksen elinkaaren aikaisista kasvihuonekaasupäästöistä. Fossiilisten polttoaineiden hyödyntäminen energiantuotannossa on kuitenkin vähentynyt merkittävästi ja enusteiden mukaan lämmityksen aiheuttamat kasvihuonekaasupäästöt pienenevät tulevina vuosikymmeninä vielä huomattavasti, jonka seurauksena rakennuksen muiden kasvihuonekaasupäästöjen osuus kasvaa ja myös näihin vaiheisiin on kiinnitettävä enemmän huomiota.

Rakennushankkeissa vaikuttamismahdollisuudet hiilijalanjälkeen ja kustannuksiin ovat alkuvaiheessa suuret, mutta tietoa on vähän. Rakennushankkeen edetessä tiedon määrä lisääntyy, mutta vaikutusmahdollisuudet hiilijalanjälkeen ja kustannuksiin pienenevät. Tehokkaimmat hiilijalanjäljen ja kustannusten ohjaamisen toimenpiteet tulisi siis tehdä rakennushankkeen alkuvaiheessa.

Alkuvaiheen vähäisen tiedon ongelman ratkaisuun Haahtela on kehittänyt TVD-simulaatiomallin, joka hankkeen lähtötietojen perusteella simuloi rakennuksen tiloineen ja antaa yksityiskohtaiset arviot kokonaispinta-alasta, hiilijalanjäljestä ja kustannuksista. Kun jo alkuvaiheessa päästään vertailemaan isojen päätösten vaikutusta hiilijalanjälkeen ja kustannuksiin, voidaan tätä tietoa käyttää hiilijalanjäljen ja kustannusten ohjaamisessa tehokkaasti.

Tehokkain keino pienentää rakentamisen hiilijalanjälkeä on rakentamatta jättäminen. Ihmiset kuitenkin tarvitsevat tiloja, jolloin tilat on joko rakennettava tai muokattava olevista tiloista. Rakentamisessa vaikutusmahdollisuudet rakennustuotannon hiilidioksidipäästöjen pienentämiseen suuruusjärjestyksessä suurimmasta pienimpään ovat turhan rakentamisen välttäminen ja korjausrakentamisen suosiminen, materiaalitehokkuuden parantaminen ja vähähiilisten ratkaisujen suosiminen, kiertotalous rakentamisessa ja korjaamisessa, käytön jälkeisten päästöjen vähentäminen ja jäljelle jäävien päästöjen kompensointi. Tässä tutkimuksessa on keskitytty turhan rakentamisen välttämiseen, materiaalitehokkuuden parantamiseen ja vähähiilisten ratkaisujen käyttämiseen, sillä niiden vaikutukset kasvihuonekaasupäästöihin ovat merkittäviä.

Tutkimuksessa on listattu rakennuksen elinkaaren aikaiseen hiilijalanjälkeen vaikuttavia tekijöitä sekä ehdotuksia ympäristövastuullisuuden mittareiksi ja ympäristövastuullisuuden parantamiseksi rakennushankkeen eri vaiheissa. Tutkimuksessa on myös tehty päästövähennystoimenpiteiden vertailua Haahtelan TVD-simulaatiomallilla.

Simuloimalla tehdyistä vertailuista selvisi, että tonttivalinnalla, rakennuksen käyttöasteen nostamisella sekä muodon ja massoittelemalla voidaan pienentää rakentamisen hiilijalanjälkeä tehokkaasti. Fiktiivisessä tapaustutkimuksessa em. toimenpiteillä saavutettiin 17,8 % päästövähennykset rakennustuotannossa verrattuna tavanomaiseen suunnitteluratkaisuun.

Päiväkodin arkkitehtuurikilpailun neljän eri ehdotuksen vertailussa suurin rakentamisvaiheen hiilijalanjälki oli 17,4 % suurempi kuin pienin rakentamisvaiheen hiilijalanjälki. Suurin rakentamisvaiheen kasvihuonekaasujen neliöpäästö hyötyalalle oli 27,3 % suurempi kuin pienin rakentamisvaiheen kasvihuonekaasujen neliöpäästö hyötyalalle.

Avainsanat: Rakennuksen hiilijalanjälki, massoitteleminen, ympäristövastuullisuus

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

ABSTRACT

Antti Harvala: Steering carbon footprint in the project- and proposal planning phase of a building project
Master's thesis
Tampere University
Master's Degree Education in Civil Engineering
August 2022

During the past decades, buildings greenhouse gas emissions have been regulated mainly by improving the energy efficiency of new buildings and those under renovation. The regulations have been justifiable, as the greenhouse gases emissions of the produced heat energy have been the majority of the total greenhouse gas emissions of the building. Burning of fossil fuels for heat has decreased significantly, and the greenhouse gas emissions of producing heating energy are predicted to still decrease significantly, which will make other greenhouse gas emissions hold a larger share of the total emissions, and we will have to pay more attention to these other phases also.

In a building project the chances of affecting greenhouse gas emissions and costs are great at the beginning, but the amount of information is low. While the project goes on, the amount of information increases, but the chances of affecting greenhouse gas emissions and costs decrease. The biggest decisions to decrease greenhouse gas emissions and costs should be done in the beginning of the project.

Haahtela has developed a Haahtela TVD-simulation model to tackle the problem of low amount of information and design in the beginning of the building project. The simulation model takes basic information of the project and simulates the building with its spaces and gives detailed estimates of the total area, carbon footprint and costs. As you can access the data of carbon footprint and costs in the early stages of the project, the information can be used to steer the big decisions efficiently.

The most efficient way to reduce carbon footprint is to not build. While people still need spaces, the spaces must be either built or found and made fit from existing buildings. The most potential ways to reduce carbon dioxide emissions of building production are, from the most potential to the least potential, avoiding building useless spaces and favoring renovations over building new, improving material efficiency and favoring low carbon solutions, including circular economy into building and renovation, decreasing after use emissions, and compensating the left emissions. This study is focused on avoiding building useless spaces and increasing material efficiency and the use of low carbon solutions, since the significance of those are great.

In the study there is listed matters to reduce the carbon footprint of a buildings life cycle and proposals to indicate and improve environmental responsibility during different phases of building projects. The study also includes comparison of procedures to reduce carbon footprint with Haahtela TVD-simulation model.

The comparison of the simulations indicated that by deciding the plot, increasing the use of the building, and making the shape and the mass of the building more efficient, the carbon footprint of building phase can be reduced significantly. In the fictional case-study the prior procedures reduced the carbon footprint of the building phase 17,8 % compared to a generic design solution.

In a comparison of four proposals to an architectural contest for a kindergarten, the proposal with the largest carbon footprint of the building phase was 17,4 % greater than the smallest. The proposal with the largest building phases carbon footprint for used square meter was 27,3 % greater than the smallest.

Keywords: Buildings carbon footprint, massing, environmental responsibility

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

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Haahtela-rakennuttaminen Oy:lle Haahtela-konsernin vastuullisuuden kehittämiseksi. Työtä on ollut ilo tehdä ympäristössä, jossa haasteet tunnustetaan ja tunnustetaan sekä pyrkimys entistä vastuullisempaan rakentamiseen ja työympäristöön on aitoa.

Rakennusala nähdään usein kankeana ja vanhanaikaisena. Haahtelan edistyksellistä TVD-simulaatiomallia onkin ollut erityisen mielenkiintoista ja kehittävää päästä koeajamaan.

Kiitän diplomityön mahdollistamisesta Haahtelaa sekä ohjaajia Ari Pennasta, Arto Saarta ja Juha Nykästä. Erityiskiitos Haahtelan vastuullisuustyöryhmälle ja kollegoille sparraamisesta sekä tuesta.

Helsingissä, 25.8.2022

Antti Harvala

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
1.1 Tutkimuksen taustat	2
1.2 Tutkimuksen rajaus	2
1.3 Tutkimuksen tavoitteet	3
1.4 Tutkimuksen haasteet	3
1.5 Tutkimusmenetelmät ja toteutus	4
2. EU:N, SUOMEN JA GREEN BUILDING COUNCILIN TAVOITTEET JA TOIMENPITEET ILMASTONMUUTOKSEN HILLITSEMISEKSI	6
3. YMPÄRISTÖVASTUULLISUUDEN INDIKAATTORIT RAKENNUSALALLA	10
3.1 Rakennuksen elinkaaren hiilijalanjälki	10
3.1.1 Hiilijalanjäljen yksikkö	10
3.2 Green Deal -sopimukset	11
3.3 Kierrätysaste	11
3.4 EPD-ympäristöseloste	11
3.5 Rakennuksen E-luku	12
3.6 Ympäristöluokitukset	13
3.6.1 LEED	13
3.6.2 BREEAM	14
3.6.3 RTS	14
3.6.4 Joutsenmerkki	14
3.6.5 WELL	15
4. HIILIJALANJÄLJEN LASKEMINEN	16
4.1 Kansallinen päästötietokanta	17
4.2 Arviointimenetelmät	17
4.3 Rakennuksen elinkaaren vaiheet	18
4.4 Hiilijalanjäljen kompensointi	21
5. KASVIHUONEKAASUPÄÄSTÖJEN OHJAUS	22
5.1 Massoittelu	22
5.2 Rakennusosien optimointi	24
5.2.1 U-arvojen parantaminen	24
5.2.2 Ilmanvaihto	24
5.2.3 Ikkunat	24
5.2.4 Vihreä betoni	25
5.2.5 Valaistus	25
5.3 Kompensointi	26
5.4 Tarvittavat lähtötiedot	26
5.5 Hiilijalanjälkilaskelmat	26
5.6 EU-taksonomia	27

6.RAKENNUSTEN	MASSOITTELUN	VAIKUTUS
KASVIHUONEKAASUPÄÄSTÖIHIN JA RAAKA-AINEIDEN KULUTUKSEEN		28
7.FIKTIIVINEN	TAPAUSTUTKIMUS	HIILIJALANJÄLJEN OHJAUKSESTA
RAKENNUSHANKKEEN SIMULAATIOMALLILLA HANKESUUNNITTELUVAIHEESSA		
32		
7.1	Fiktiivisen kohteen simulointi ilman tilatehokkuusoptimointia	33
7.2	Fiktiivisen kohteen simulointi optimoidulla tilatehokkuudella	35
7.3	Tulosten vertailu.....	36
7.3.1	Hammashoitoyksikön aukioloajan nostaminen	37
7.3.2	Avokonttoriosuuden kasvattaminen.....	38
7.3.3	Paikoitustarpeen pienentyminen	38
7.3.4	Kerrosluvun pienentäminen yhdellä	38
7.3.5	Massoittelun tehostaminen	39
7.3.6	Perustamissyvyyden maalaji	39
7.4	Tilatehokkuusoptimointitoimenpiteiden ja perustamisolosuhteiden	
	vaikutus rakentamisen hiilijalanjälkeen	39
8.EHDOTUSSUUNNITELMIEN	KASVIHUONEKAASUPÄÄSTÖJEN	VERTAILU
RAKENNUSHANKKEEN SIMULAATIOMALLIN AVULLA.....		41
8.1	Kilpailukohde.....	41
8.2	Tarkasteluun valitut ehdotukset.....	42
8.3	Simuloinnin lähtötiedot	45
8.3.1	Nimimerkki "Poks"	48
8.3.2	Nimimerkki "JEAN".....	48
8.3.3	Nimimerkki "LÄTSA"	49
8.3.4	Nimimerkki "LUOTSI"	49
8.4	Tapaustutkimuskohteen ehdotusten simulointi	50
8.4.1	Nimimerkki "Poks"	50
8.4.2	Nimimerkki "JEAN".....	51
8.4.3	Nimimerkki "LÄTSA"	52
8.4.4	Nimimerkki "LUOTSI"	53
8.5	Tulosten vertailu.....	55
9.TOIMENPIDE-EHDOTUKSIA.....		57
9.1	Hiilijalanjäljen ohjaaminen hankesuunnitteluvaiheessa	57
9.2	Hiilijalanjäljen ohjaaminen ehdotussuunnitteluvaiheessa.....	57
10.	JATKOTUTKIMUS.....	59
11.	YHTEENVETO	60
LÄHTEET		62

LYHENTEET JA MERKINNÄT

CO ₂ e	Kasvihuonekaasupäästöt muunnetaan ekvivalentiksi hiilidioksidiksi, joka on yhteismitta, jonka avulla voidaan laskea yhteen eri kasvihuonekaasupäästöjen vaikutus kasvihuoneilmiön voimistumiseen. (Tieteen termipankki, 2022).
EK	Elinkeinoelämän keskusliitto
EPD	Environmental Product Declaration, eli tuotteen ympäristöseloste, on dokumentti, jossa on ulkopuolisen tahon varmentamana todennettu tuotteen ympäristövaikutukset
Elinkaaren hiilijalanjälki	Rakennuksen kasvihuonekaasupäästöjen kokonaismäärää rakennuksen elinkaaren aikana muunnettuna hiilidioksidiekvivalentiksi (CO ₂ e).
GBCF	Green Building Council Finland
Haahtela TVD	Kiinteistö- ja rakennusalan työkalu, joka simuloi lähtötietojen perusteella rakennettavan kiinteistön tiloineen ja antaa yksityiskohtaiset arviot mm. hankkeen kustannuksista, kokonaispinta-alasta ja hiilijalanjäljestä.
Hiilibudjetti	Rakennukselle asetettu hiilijalanjäljen enimmäisarvo
Hiilijalanjälki	Tuotteen tai palvelun ilmastovaikutus muunnettuna hiilidioksidiekvivalentiksi (CO ₂ e). Rakennushankkeissa hiilijalanjäljellä tarkoitetaan yleensä elinkaaren hiilijalanjälkeä.
Hiilipiikki	Rakennuksen elinkaaren alussa rakentamisesta ja rakennusmateriaalien valmistamisesta syntyvä hiilidioksidi- ja muiden kasvihuonekaasupäästöjen piikki
IPCC	Hallitustenvälinen ilmastomuutospaneeli (Intergovernmental Panel on Climate Change), jonka tavoitteena on analysoida tieteellisesti tuotettua tietoa kansallista ja kansainvälistä päätöksentekoa varten. IPCC:n arvioinnin keskeiset tulokset julkaistaan raporteina.
KiRa-ala	Kiinteistö- ja rakennusala
Moduuli	Tässä tutkimuksessa moduulilla tarkoitetaan rakennuksen elinkaaren vaihetta hiilijalanjälkilaskennassa. Vaiheet ilmoitetaan kronologisessa järjestyksessä A1-D, jossa A1 on raaka-aineiden hankinta ja käsittely ja D on elinkaaren ulkopuoliset vaiheet, kuten uudelleenkäyttö.
Päästökauppa	Päästökaupassa EU jakaa ja huutokauppaa päästöoikeuksia. Päästöoikeuksien tarkoituksena on laittaa päästökauppasektoriin kuuluvat yritykset joko maksamaan päästöistään tai vähentämään niitä.
Päästökauppasektori	Päästökauppasektori tarkoittaa aloja ja yrityksiä, jotka kuuluvat päästökaupan alle. Päästökauppaan kuuluvat esimerkiksi suuret

teollisuuslaitokset sekä sähkön- ja lämmöntuotanto. Rakennusten lämmityksen (rakennusten erillislämmityksessä käytetty fossiilinen polttoaine) siirtämisestä päästökaupan piiriin on päätetty EU:n ympäristöneuvostossa 29.06.2022.

- Päästöoikeus** Päästöoikeus on EU:n päästökaupan kauppatavara. Yksi päästöoikeus oikeuttaa päästämään ilmakehään yhden tonnin hiilidioksidia. Päästökauppaa käydään pörseissä.
- Taakanjakosektori** Taakanjakosektori tarkoittaa aloja ja yrityksiä, jotka eivät kuulu päästökaupan alle. Taakanjakosektoriin kuuluvat mm. rakentaminen, rakennusten lämmitys (rakennusten erillislämmityksessä käytetty fossiilinen polttoaine), asuminen, maatalous, liikenne, jätehuolto ja teollisuuden F-kaasut. Rakennusten lämmityksen siirtämisestä päästökaupan piiriin on päätetty EU:n ympäristöneuvostossa 29.06.2022.
- Ympäristö** Organisaation toimintaolosuhteet, jotka pitävät sisällään ilman, veden, maan, luonnonvarat, kasvillisuuden, eläinkunnat, ihmiset ja näiden väliset vuorovaikutukset

1. JOHDANTO

Yhteiskuntavastuu tarkoittaa ympäristöä, taloutta ja sosiaalisia asioita tai yhteiskuntaa koskevia kysymyksiä. Kestävällä kehityksellä tarkoitetaan toisinaan yhteiskuntavastuuta, mutta kestävä kehitys on yhteiskuntavastuuta laajempi käsite, jolla tarkoitetaan kansakuntien pyrkimystä vastuullisemmaksi yhteiskunnaksi. (Törnroos, 2011). Tässä tutkimuksessa keskitytään ympäristövastuullisuuteen.

Kiinteistö- ja rakennusalan ympäristövastuullisuuden yksi suurimmista osa-alueista on rakennusten elinkaarenaan aiheuttama hiilijalanjälki. Nykyisten keinojen avulla hiilijalanjälkeä pyritään pienentämään parantamalla energiatehokkuutta sekä käyttämällä vähähiilisiä ratkaisuja sekä rakennusmateriaaleja. Tehokkain keino olisi kuitenkin vähentää rakentamista, johon voidaan vaikuttaa tarveselvityksellä, tilatehokkuuden parantamisella sekä lisäämällä tietoisuutta rakentamisen päästöistä.

Rakennusten neliölle kohdistuva hiilijalanjälki vaihtelee merkittävästi eri rakennusten välillä. Rakennuksen hiilijalanjälkeen vaikuttavat rakennukseen sijoitettavat toiminnot, valittu suunnitteluratkaisu sekä rakennuspaikan olosuhteet. Rakennuksen hiilijalanjälkeen vaikuttavat tekijät voivat olla ortogonaalisia, esimerkiksi käyttäjän viikoittaisesta aukioloajasta johtuva käyttöaste ja rakennesuunnittelijan valitsema runkoratkaisu vaikuttavat molemmat hiilijalanjälkeen, mutta päätöksillä ei ole mitään tekemistä toistensa kanssa.

Haahtelan TVD-simulaatiomallin avulla rakentamisen hiilijalanjälki saadaan simuloitua jo alkuvaiheen isoja päätöksiä tehtäessä, jolloin hiilijalanjälki ohjaa päätöksiä toiminnasta, suunnitteluratkaisuista sekä rakennuspaikasta jo ennen kuin rakennus on suunniteltu. Simulaatiomalli simuloi kielikäännöksi toiminnasta tilojen tarpeen ja tiloista rakennuksen geometrian ja järjestelmät, jonka lisäksi arkkitehdin esittämä geometria voidaan siirtää simulaattoriin myöhemmässä vaiheessa. Toistaiseksi simulaatiomalli laskee rakentamisvaiheen eli moduuli A:n hiilijalanjäljen, mutta simulaatiomallin on tarkoitus laajentua vuonna 2023 kattamaan koko rakennuksen elinkaaren aikainen hiilijalanjälki ja myöhemmässä vaiheessa tuoda eri rakennusmateriaalit ja rakenneratkaisut vertailtavaksi keskenään. Simulaatiomallia käyttämällä voidaan poiketa perinteisestä rakennushankkeen kronologiasta, jossa päätökset hankesuunnittelusta yleissuunnitteluun tehdään ensin, ja vasta sen jälkeen tarkastellaan kaikkien eri päätösten summan

seurauksia. Informaatiota voidaan siis käsitellä rinnakkain ja nopeat muutokset ovat mahdollisia ja jopa toivottavia. Haahtelan TVD-simulaatiomallia kutsutaan tässä tutkimuksessa myöhemmin myös nimellä rakennushankkeen simulaatiomalli.

1.1 Tutkimuksen taustat

Tämän diplomityön toimeksiannon taustana on Haahtelan tarve selvittää, miten kehittää oman toiminnan ympäristövastuullisuutta ehdotussuunnitteluvaiheessa hiilijalanjälkeä ohjaamalla. Vastuullisuustavoitteet tulevat toistaiseksi pääosin tilaajilta, joita taas ohjaavat lainsäädäntö, määräykset, ohjeet sekä tilaajien omat arvot. Haahtela haluaa olla myös vastuullisuudessa edistyksellinen eikä ainoastaan reagoida vaatimuksiin.

Suomi on kansainvälisten ilmast sopimusten ja EU:n kautta sitoutunut merkittäviin ilmastotoimiin. (Bionova Oy, 2017). Ympäristöministeriö on syksyllä 2017 julkaissut vähähiilisen rakentamisen tiekartan, jonka viitoittamana kiinteistö- ja rakennusalan on tarkoitus siirtyä vähähiiliseen rakentamiseen vuoteen 2025 mennessä. (Ympäristöministeriö, 2017).

Euroopan unionin tavoitteet ovat 55 % päästövähennykset vuoteen 2030 ja hiilineutraalius vuoteen 2050 mennessä (vertailutasona vuoden 1990 päästöt). Suomen ilmasto-paneelin suositukset Suomen päästövähennyksiksi ovat 60 % vuoteen 2030 ja 70 % vuoteen 2035 mennessä (vertailutasona vuoden 1990 päästöt). Jäljelle jäävä 30 % oletetaan yhtä suureksi silloisen metsien hiilinielun kanssa, jolla hiilineutraaliteetti on saavutettu.

Sanna Marinin hallitusohjelman (2019) tavoitteena on hiilineutraali Suomi vuoteen 2035 mennessä, mikä edellyttää nopeutettuja päästövähennyksiä kaikilla sektoreilla sekä hiilinielujen vahvistamista. (Marin, 2019).

1.2 Tutkimuksen rajaus

Tutkimus on osa Haahtelan yhteiskuntavastuullisuuden parantamiseksi tehtävää työtä. Tutkimuksen rajauksessa päädyttiin tarkastelemaan projektinjohtoyhtiön toiminnan ympäristövastuullisuutta. Ympäristövastuullisuus on asiana ajankohtainen, ja siihen kiinnitetään kasvavassa määrin huomiota kansallisesti ja globaalisti.

Projektinjohtoyhtiössä ympäristövastuullisuuden suurimpana vaikutusmahdollisuutena on nähty hiilijalanjäljen ohjaus. Hiilijalanjälkeä voidaan ohjata läpi rakennuksen koko

elinkaaren, mutta suurimmat vaikutusmahdollisuudet on tunnistettu olevan rakennushankkeen alkumetreillä, minkä vuoksi tämän tutkimuksen pääpaino on rakennushankkeen hanke- ja ehdotussuunnitteluvaiheen hiilijalanjäljen ohjaamisessa.

Ympäristövastuullisuuden muita osa-alueita käsitellään tutkimuksessa pintapuolisemmin. Rakentamisessa ympäristövastuullisuuteen liittyvät rakennusten elinkaaren hiilijalanjäljen lisäksi mm. luonnon monimuotoisuuden säilyttäminen, haitallisten ja myrkyllisten aineiden käsittely sekä jätteiden käsittely.

1.3 Tutkimuksen tavoitteet

Päätavoitteena diplomityössä on selvittää, mitkä tekijät vaikuttavat yleisesti rakennushankkeen hiilijalanjälkeen, miten niitä ohjataan ja miten ohjausta voidaan parantaa keskittyen ehdotussuunnitteluvaiheen mahdollisuuksiin ja ratkaisuihin koskien rakentamisvaiheen hiilijalanjäljen ohjaamista. Haahtela on kehittänyt kiinteistön simulaatiomallin (Haahtela TVD), joka simuloi myös rakentamisvaiheen eli moduuli A:n hiilijalanjäljen jo ennen kuin rakennus on suunniteltu. Tutkimuksessa selvitetään vertailujen avulla, miten ja kuinka tehokkaasti TVD-simulaatiomallilla voidaan ohjata rakentamisen hiilijalanjälkeä.

Päätavoitteeseen pääsemiseksi tutkimuksen on tarkoitus tunnistaa mahdollisuudet vaikuttaa hankkeen hiilijalanjälkeen, tuottaa tietoa ja ehdotuksia hiilijalanjäljen ohjauskeinoista rakennushankkeen eri vaiheissa ja määritellä ympäristövastuullisuuden mittausmenetelmät.

1.4 Tutkimuksen haasteet

Vastuullisuuden mitattavuus nähdään usein vaikeana ja mittauskäytännöt puutteellisina. Hiilijalanjäljen ohjaus säädösten osalta on ympäristöministeriössä kehitteillä, joten hiilijalanjäljen raja-arvoja ei toistaiseksi ole saatavilla.

Tehokkain keino hiilijalanjäljen pienentämiseen on rakentamatta jättäminen. Rakentamispäätös kuitenkin syntyy tilojen tarpeesta, joten vaihtoehdot ovat joko saada tarvittavat toiminnot mahtumaan olemassa oleviin rakennuksiin, rakentaa uusi rakennus tai jokin näiden yhdistelmä.

Alustavan kirjallisuusselvityksen perusteella haasteeksi on tunnistettu myös vastuullisuuskäsitysten nopea päivittyminen uuden tiedon valossa sekä mittauksien nopea vanheneminen suuren muutosnopeuden vuoksi.

Vertailtavien, tarkoitukseen sopivien kohteiden löytäminen on vaikeaa. Tutkittava kohde tulisi olla jo rakennettu tai vähintäänkin suunniteltu sekä käyttötarkoitukseltaan sellainen, että hiilijalanjälkeä voidaan ohjata rakennuksen tilatehokkuutta parantamalla. Tilatehokkuutta ei merkittävästi voida parantaa massoittelulla esimerkiksi asuinrakennuksissa.

Hiilijalanjäljen raja-arvo-ohjaus on kehitteillä rakennustyyppikohtaisesti. Hiilijalanjäljen raja-arvo-ohjauksessa yksi ongelma on useampia käyttötarkoituksia kattavien rakennusten vertaileminen keskenään. Myös samaan käyttötarkoitukseen kuuluvien rakennusten välillä tarpeet voivat poiketa olennaisesti, esimerkiksi kevyen ja raskaan teollisuuden välillä.

Rakennuksen hiilijalanjälkeen vaikuttavat mm. pohjaolosuhteet, sijainti, ääneneristävyyksivaatimukset, massoittelu, suunnitteluratkaisut, muuntojoustavuus, tekninen käyttöikä ja tilatehokkuus. (Kempainen, 2020). Mikäli ympäristöministeriön tulevat raja-arvot eivät ota kattavasti huomioon rakennuksen luonnetta, voi raja-arvo-ohjaus johtaa keinotekoiseen, neliöperusteisen hiilijalanjäljen pienentämiseen rakennuksen kokonaishiilijalanjäljen pienentämisen sijasta, sillä rakentamalla väljempää tilaa saadaan jakajana käytettävää neliömäärää suuremmaksi.

Rakennuksen vähähiilisyden arviointimenetelmä (2021) erottelee tontin olosuhteista aiheutuvan hiilijalanjäljen rakennuksen hiilijalanjäljestä, mikä hieman helpottaa eri sijainneilla olevien rakennusten vertailua keskenään. Tontin olosuhteet kuitenkin vaikuttavat merkittävästi rakennuksen hiilijalanjälkeen, joten ne tulisi arviointimenetelmän helpotuksesta huolimatta ottaa huomioon.

1.5 Tutkimusmenetelmät ja toteutus

Tutkimus tehdään kirjallisuuskatsauksena sekä tapaustutkimuksina. Kirjallisuuskatsaus tuottaa tietoa vallitsevasta lainsäädännöstä, standardeista, ohjeista, vaatimuksista, käytännöistä, rakennusalan kasvihuonekaasupäästöistä ja energiankulutuksesta.

Kirjallisuuskatsauksen lisäksi tutkimuksessa vertaillaan rakennushankkeen simulointimallin avulla rakennushankkeen alkupään valintojen merkitystä hiilijalanjälkeen. Simulaatiomallista on mahdollista saada jo hankesuunnitteluvaiheessa rakentamisen hiilijalanjälkilaskelma, jota voidaan käyttää vertailukohteena asetettaessa hiilibudjettia. Hiilijalanjälkeä voidaan siis vertailla jo rakennuksen sijaintia, toimintoja, kokoa ja muotoa määrittellessä, minkä lisäksi voidaan vertailla runko- ja rakenneratkaisujen, materiaalien ja työmaatoimintojen päästöjä.

Vertailukohteiksi valittiin fiktiivinen rakennushanke hankesuunnitteluvaiheen vertailua varten sekä ehdotussuunnitteluvaiheeseen oikea kohde, jossa vertailtiin neljää arkkitehtikilpailun versiota. Vertailuissa verrataan toiminnoiltaan samanlaisia rakennuksia keskenään ja tutkitaan massoittelem, rakennuksen muodon ja rakennuksen käyttöasteen vaikutusta rakentamisen hiilijalanjälkeen. Fiktiivisessä tapaustutkimuksessa tutkitaan myös rakennuspaikan vaikutusta rakentamisvaiheen hiilijalanjälkeen. Vertailussa ei oteta huomioon rakennuksen koko elinkaaren hiilijalanjälkeä, vaan ainoastaan moduulit A1-5. Moduulit A1-5 valikoituivat käytettävän, uuden simulaatiomallin ominaisuuksien mukaan.

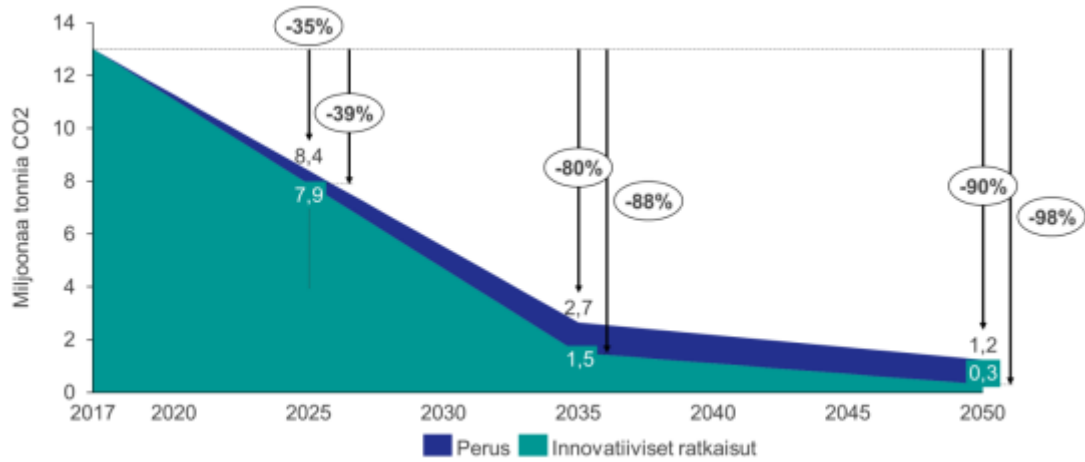
2. EU:N, SUOMEN JA GREEN BUILDING COUNCILIN TAVOITTEET JA TOIMENPITEET ILMASTONMUUTOKSEN HILLITSEMISEKSI

Suomen hiilineutraaliustavoitteella vuoteen 2035 mennessä tarkoitetaan sitä, että vuonna 2035 Suomi ei enää kuormittaisi ilmakehää, kun hiilinielut sitoisivat saman verran hiilidioksidia, kuin sitä pääsee ilmaan eri päästölähteistä. Hiilinieluista suurin on metsät. Suomessa KiRa-ala aiheuttaa noin 30 % Suomen kasvihuonekaasupäästöistä (Kempainen, 2020) ja Euroopassa 35 % Euroopan kasvihuonepäästöistä (Pomponi, Moncaster, 2016).

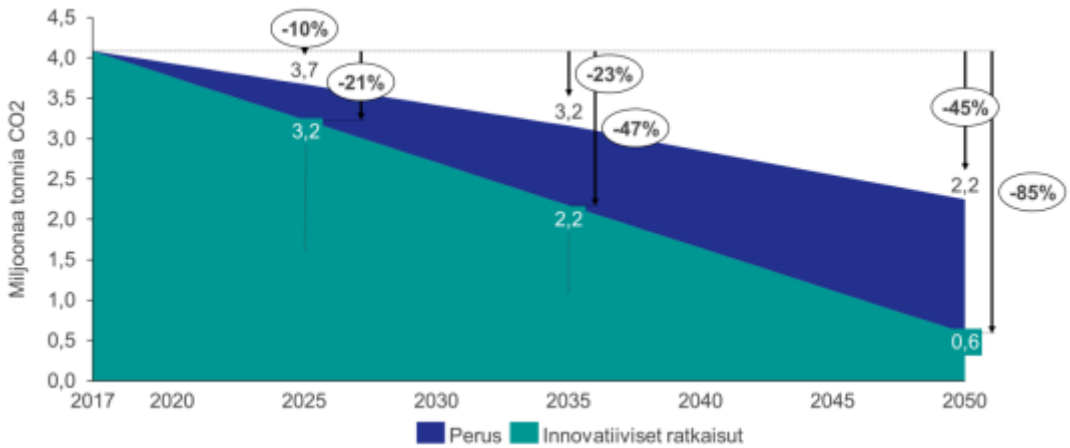
Hallitusohjelman mukaan Rakennusteollisuus RT on yhdessä sidosryhmien ja ympäristöministeriön kanssa laatinut vähähiilisen rakentamisen tiekartan. Siinä on esitetty skenaariot hiilijalanjäljen pienenemiselle toteuttamalla perusratkaisut sekä kunnianhimoisempi, myös innovatiiviset ratkaisut huomioon ottava skenaario. (Raivio et al., 2020).

Tiekartan laatimisvuonna 2017 on rakennetun ympäristön hiilijalanjälki ollut 17,1 miljoonaa tonnia CO₂e. Rakennusten käytönaikaisen energian hiilijalanjälki ollut 13,0 miljoonaa tonnia CO₂e (76 % koko rakennetun ympäristön hiilijalanjäljestä) ja rakennusteollisuuden (rakennusmateriaalit, työmaatoiminnot, logistiikka ja jäte) hiilijalanjälki ollut 4,1 miljoonaa tonnia (24 % koko rakennetun ympäristön hiilijalanjäljestä). (Raivio et al., 2020)

Suomessa on vuoteen 2035 mennessä tarkoitus laskea rakennusten käytönaikaisen energian hiilijalanjälki tasolle 1,5–2,7 miljoonaa tonnia CO₂e (laskua 80–88 %) ja rakennusteollisuuden hiilijalanjäljen tasolle 2,2–3,2 miljoonaa tonnia CO₂e (laskua 23–47 %). Vuoteen 2050 mennessä on tarkoitus laskea (vuoteen 2017 verrattuna) rakennusten käytönaikaisen energian hiilijalanjäljen tasolle 0,3–1,2 miljoonaa tonnia CO₂e (laskua 90–98 %) ja rakennusteollisuuden hiilijalanjäljen tasolle 0,6–2,2 miljoonaa tonnia CO₂e (laskua 45–85 %). (Raivio et al., 2020)



Kuva 1. Rakennusten käytönaikaisen energian hiilijalanjäljen kehittyminen vuosina 2017-2050 perus- ja innovatiiviset ratkaisut -skenaarioissa (Raivio et al., 2020).



Kuva 2. Rakennusteollisuuden (rakennusmateriaalit, työmaatoiminnot, logistiikka, jäte) hiilijalanjäljen kehittyminen vuosina 2017–2050 perus- ja innovatiiviset ratkaisut -skenaarioissa. Tiekartan skenaarioiden perusteella rakennusteollisuuden osuus rakennetun ympäristön hiilijalanjäljestä tulee olemaan käytönaikaisen energian osuutta suurempi ennen vuotta 2035. (Raivio et al., 2020).

Rakentamisen hiilidioksidipäästöjen merkityksellisyyttä käsittelevässä artikkelissa Ruuska toteaa, että rakennustuotteiden hiilijalanjäljen merkitys tulee kasvamaan rakennusten energiatehokkuuden kehittymisen myötä. (Ruuska, Häkkinen, 2014).

Ympäristöministeriö valmistelelee vähähiilisen rakentamisen säädösohjausta asetuksella rakennuksen ilmastaselvityksestä, jonka on tarkoitus astua voimaan ennen vuotta 2025. Asetus liittyy maankäyttö- ja rakennuslain kokonaisuudistukseen, jonka lakiluonnos on tulossa lausunnon myöhemmin. Ilmastaselvityksellä on tarkoitus tehdä näky-

väksi uudisrakennuksen koko elinkaaren aikaiset kasvihuonekaasupäästöt ja peruskorjattavien rakennusten korjauksen ja korjauksen jälkeiset kasvihuonekaasupäästöt. Ilmastaselvitys tehdään ympäristöministeriön laatimalla rakennuksen vähähiilisyden arviointimenetelmällä, joka perustuu Euroopan komission laatimaan Level(s)-menetelmään sekä eurooppalaisiin kestävästä rakentamisesta koskeviin standardeihin. Arviointimenetelmää on käsitelty laajemmin kappaleessa 4.2. (Ympäristöministeriö, 2021)

Euroopan unioni on hyväksynyt kunnianhimoista lainsäädäntöä monilla politiikan aloilla täyttääkseen ilmastonmuutosta koskevat sitoumuksensa. Vuonna 2017 EU oli vähentänyt päästöjään lähes 22 % vuoteen 1990 verrattuna saavuttaen vuoden 2020 päästövähennystavoitteensa kolme vuotta etuajassa.

Joulukuussa 2020 EU-johtajat hyväksyivät sitovan tavoitteen, jonka mukaan EU:n sisäisiä kasvihuonekaasupäästöjä on vähennettävä vähintään 55 % vuoden 1990 tasosta vuoteen 2030 mennessä. Tavoite on aiempaa 40 % tavoitetta merkittävästi korkeampi. (Eurooppa-neuvosto, 2022).

Edelleen kesällä 2021 voimaan astuneessa eurooppalaisessa ilmastolaissa vuoden 2030 tavoitteeksi on kirjattu 55 % päästövähennykset vuoteen 2030 mennessä ja ilmastoneutraaliustavoite vuoteen 2050 mennessä. Ilmastolain tavoitteet ovat laillisesti sitovia. (Ympäristöministeriö, viitattu 28.6.2022).

Yleisesti suurimmat vähennykset hiilijalanjäljessä voidaan saavuttaa projektin varhaisissa vaiheissa. Projektin edetessä hiilijalanjäljen pienentämisestä tulee suunnitteluratkaisuja muuttamalla haastavampaa ja kalliimpaa. (Adams et al., 2022).

Green Building Councilin mukaan materiaalitehokkuuden parantamisessa on noudatettava hierarkiaa, jossa vaiheet tärkeysjärjestyksessä ovat: turhan rakentamisen poistaminen ja korjausrakentamisen suosiminen, rakentamisen materiaalimenekin optimointi suunnittelutyökaluilla ja tietokantoja hyödyntäen, kiertotalouden sisällyttäminen rakentamiseen ja korjaamiseen sekä elinkaariarvioiden tekeminen rakennuksen käytön jälkeisten päästöjen vähentämiseksi sekä viimeisenä jäljelle jäävien päästöjen kompensointi tehokkaasti ja läpinäkyvästi.

Vasta hiljattain Euroopassa on ruvettu kiinnittämään huomiota rakennusten koko elinkaaren kasvihuonekaasupäästöihin, kun aiemmin paino on ollut energiatehokkuuden kasvattamisessa. Uusissa energiatehokkaissa rakennuksissa elinkaaren muut vaiheet ovat jo suurempia kasvihuonekaasupäästölähteitä kuin käytön aikainen energiankulutus, mikä luo painetta vähentää päästöjä tuotteiden valmistuksesta, kuljetuksesta, työmaatoiminnoista, korjauksista ja purkamisesta.

Kansallisesti rakennuskannan hiilineutraaliteetin saavuttamiseksi tulee kaikkien uusien rakennusten olla hiilineutraaleita. Hiilineutraalin rakennuksen tarkkaa määritelmää ei ole vielä julkaistu, mutta sen tulisi selkeyttää raja-arvoja rakennuksen elinkaaren kasvi-huonekaasupäästöille EN 15978 -standardiin perustuen. Hiilineutraalin rakennuksen määritelmää pitää tukea EU:n jäsenmaiden ohjeissa EU:n sisäisen vertailtavuuden mahdollistamiseksi.

Green Building Councilin mukaan uusien rakennusten rakennusmateriaalien aiheuttamia päästöjä tulisi leikata 40 prosenttiyksikköä vuoteen 2030 mennessä perustuen keskimääräisiin mitattuihin arvoihin. Vaikka tietyt aloitteet ovat jo edistäneet kunnianhimoisia tavoitteita ja energiatehokkuutta, tarvitaan tuotevalmistajille lisää kannustimia vähähiilisten teknologioiden ja prosessien kehittämiseksi. Nämä toimenpiteet voisivat sisältää myös kannustimia materiaalien uudelleenkäyttöön ja kierrätykseen.

Valmistajat saattavat nähdä tuotteiden ympäristöselosteiden (EPD) kehittämisen ja julkaisemisen aikaa vievänä ja kalliina. Tämän seurauksena materiaalitoimittajilla voi olla vaikeuksia toimittaa sertifioituja tuotteita ja tilaajat tyytyvät käyttämään tuotteita ilman sertifiointeja. On välttämätöntä tehdä materiaalien päästötietojen laatimisesta helpompaa ja halvempaa, jotta tilaajilla olisi pääsy vertailukelpoiisiin päästötietoihin. (A. Nugent et al., 2022).

3. YMPÄRISTÖVASTUULLISUUDEN INDIKAATORIT RAKENNUSALALLA

Yritys voi ottaa yhteiskuntavastuun tai jonkin sen osa-alueista, kuten ympäristövastuun, yrityksen strategian osa-alueeksi sisällyttämällä sen järjestelmiinsä, toimintaperiaatteisiinsa ja päätöksentekoonsa. Päämäärien tulisi olla yksityiskohtaisia ja mitattavia tai todennettavia. Yksi tavallisimmista menetelmistä on indikaattoreihin perustuva arviointi. Indikaattori antaa tuloksista kvalitatiivista ja kvantitatiivista tietoa, joka on vertailukelpoista ja osoittaa tulosten muuttumisen ajan kuluessa. Indikaattorien tulisi olla selkeitä, informatiivisia, käytännöllisiä, vertailukelpoisia, paikkansa pitäviä, uskottavia ja luotettavia. (ISON tekninen komitea ISO/TMBG, 2020).

3.1 Rakennuksen elinkaaren hiilijalanjälki

Rakennuksen elinkaaren hiilijalanjälki, eli rakentamisesta, rakennuksen käytöstä ja rakennuksen purkamisesta aiheutuneet kasvihuonekaasupäästöt, on yksi merkittävimmistä ympäristövastuullisuuden alueista. Hiilijalanjälkeä ja sen laskentaa on käsitelty laajemmin kappaleessa 4.

3.1.1 Hiilijalanjäljen yksikkö

Hiilijalanjälkeä on perinteisesti mitattu neliöperusteisesti tai kokonaissummana. Myös tuleva raja-arvo-ohjaus on suunnitteluvaiheessa raja-arvoperusteinen, eli raja-arvot ovat mahdollisesti tulossa muodossa kilogrammaa hiilidioksidiekvivalenttia neliölle vuodessa ($\text{kgCO}_2\text{e}/\text{m}^2/\text{a}$) 50 vuoden tarkastelujaksolla. Hiilijalanjälkeä voitaisiin kuitenkin verrata myös käyttäjäarvon kautta, joka voisi olla vaikkapa asuinrakennuksissa asukasmäärä ($\text{kgCO}_2\text{e}/\text{asukas}/\text{a}$), hammaslääkäriissä poliklinikkakäyntien määrä ($\text{kgCO}_2\text{e}/\text{käynti}$) tai toimistoympäristössä henkilötyövuosi ($\text{kgCO}_2\text{e}/\text{htv}$). Edellä mainitut mittausperusteet tukisivat myös arvon tuottamista asiakkaalle tilatehokkuutta parantamalla eivätkä kannustaisi tekemään tarvetta suurempia ja väljempää tiloja raja-arvoihin pääsemiseksi.

3.2 Green Deal -sopimukset

Rakennustyömailla yksi ympäristövastuullisuuden indikaattori on julkisille toimijoille tarkoitettu vapaaehtoinen green deal -sopimus. Ensimmäisen julkisen sektorin green deal -sopimuksen ovat syyskuussa 2020 allekirjoittaneet ympäristöministeriö, Senaatti-kiinteistöt sekä Espoon, Helsingin, Turun ja Vantaan kaupungit. Green deal -sopimuksen tavoitteena on, että mukana olevien kuntien ja Senaatin työmaat luopuvat fossiilisten polttoaineiden käytöstä vuoteen 2025 mennessä sekä vuoteen 2030 mennessä käytettävistä työkoneista ja työmaiden kuljetuksista vähintään 50 % toimii sähköllä, biokaasulla tai vedyllä. Sopimus on ensimmäinen green deal -sopimus, joka on allekirjoitettu julkisen sektorin kesken edistämään kestäviä hankintoja ja on voimassa vuoden 2030 loppuun. (Motiva Oy, luettu 29.04.2022).

Green deal -sopimuksen tavoitteita voi ja on syytä noudattaa myös muussa rakentamisessa. Yhtenä työmaiden ympäristövastuullisuuden indikaattorina voitaisiin käyttää fossiilisten polttoaineiden kulutuksen määrää sekä työkoneiden ja kuljetusten käyttövoimaa.

3.3 Kierrätysaste

Rakennustyömailla yksi ympäristövastuullisuuden indikaattori on kierrätetyn jätteen prosenttiosuus kaikesta jätteestä. Kierrätysprosentin määrittämisessä tulee huomioida, että EU-taksonomia ei hyväksy puun polttamista energiaksi kierrättämisenä.

3.4 EPD-ympäristöseloste

Projektinjohdossa yksi indikaattoreista voisi olla materiaaleilta vaaditut EPD:t, eli rakennustuotteen ympäristöselosteet. Green Building Council Finlandin toimintaohjeen mukaan EPD-vaatimukset kannattaa aloittaa suurimmista materiaaleista ja laajentaa vaatimusta tasaisesti kattamaan kaikki materiaalihankinnat vuoteen 2035 mennessä.

EPD sisältää tuotteelle selvityksen hiilijalanjäljestä, jolloin rakennushankkeen hiilijalanjälkeä laskettaessa tuotteita voidaan vertailla keskenään. EPD sisältää myös vaikutukset otsonin tuhoutumiseen, maaperän ja vesistöjen happamoitumiseen, rehevöitymiseen sekä uusiutumattomien energiavarojen ja mineraalivirtojen ehtymiseen. Suomessa EPD-todentamista hoitaa Rakennustietosäätiö, jonka rekisterissä (27.5.2022) on noin 190 tuotetta.

Mikäli EPD-dokumentteja ei ole saatavilla, käytetään laskennassa Rakentamisen päätötietokannan arvoja, jolloin vertailua eri tuotemerkkien välillä ei voida suorittaa. Mikäli

tuotteella ei ole EPD-dokumenttia eikä sitä löydy päästötietokannasta, tulee hiilijalanjälki selvittää muilla luotettavilla keinoilla.

3.5 Rakennuksen E-luku

Rakennuksen E-luku eli energiatehokkuuden vertailuluku lasketaan rakennuksen laskennallisen ostoenergiankulutuksen ja ostoenergiamuodon päästökertoimien mukaan. E-luku määrittää rakennukselle energialuokan. Energialuokka ilmoitetaan energiatodistuksessa, joka yleensä vaaditaan vakituiseen käyttöön tarkoitetuille, yli 50 m² kokoisille uudisrakennuksille.

E-luku lasketaan seuraavasti:

$$E = \frac{f_{KL}Q_{KL} + f_{kaukojäähdytys}Q_{kaukojäähdytys} + \sum_i f_{polttoaine,i}Q_{polttoaine,i} + f_{sähkö}W_{sähkö}}{A_{netto}}$$

jossa:

E = energiatehokkuuden vertailuluku, kWh_E/(m² a)

Q_{KL} = kaukolämmön kulutus vuodessa, kWh/a

$Q_{kaukojäähdytys}$ = kaukojäähdytyksen kulutus vuodessa, kWh/a

$Q_{polttoaine,i}$ = polttoaineen i sisältämän energian kulutus vuodessa, kWh/a

$W_{sähkö}$ = sähkön kulutus vuodessa, missä on otettu huomioon vähennykset rakennukseen kuuluvalla laitteistolla ympäristöstä vapaasti hyödynnettävästä energiasta otetusta energiasta siltä osin, kuin se on käytetty rakennuksessa siihen tapahtuvan vakioituu käyttöön perustuvan energiankulutuksen kattamiseen, kWh/a

f_{KL} = kaukolämmön energiamuodon kerroin

$f_{kaukojäähdytys}$ = kaukojäähdytyksen energiamuodon kerroin

$f_{polttoaine,i}$ = polttoaineen i energiamuodon kerroin

$f_{sähkö}$ = sähkön energiamuodon kerroin

A_{netto} = rakennuksen lämmitetty nettoala, m²

(Tiilikainen, Kalliomäki, 2017).

Parempaan E-lukuun tähtääminen yleensä vähentää rakennuksen kasvihuonekaasupäästöjä. E-luvun päästökertoimet eivät kuitenkaan ota huomioon ostetun sähköenergian tuotantomuotoa, jonka vuoksi uusiutuvan energian käytöstä (pl. rakennuksen oma aurinkovoimala) ei saa parannusta E-lukuun ja näin energialuokkaan. Myöskään kaukolämmön tuotantotapa ei vaikuta kaukolämmön päästökertoimeen. E-luvun parantaminen ei siis ole täysin aukoton keino hiilijalanjäljen pienentämiseen.

3.6 Ympäristöluokitukset

Ympäristösertifiointijärjestelmät on lanseerattu kiinteistöjen ympäristötehokkuuden mittaamiseen, todentamiseen ja vertailun mahdollistamiseen. Kiinteistöjen sertifiointiprosessin tarkoituksena on varmistaa hankkeen kestävän kehityksen ajattelu koko prosessin läpi, tunnistaa ja todentaa rakennuksen ympäristöystävällisyys ja mahdollistaa rakennusten vertailu keskenään. Oleellisena osana sertifiointia ulkopuolinen arviointi varmistaa rakennuksen suunnittelun, rakentamisen ja toiminnan tarkoituksenmukaisuuden. Ympäristösertifiointi viestii aina vahvasti rakennuksen omistajan ympäristömyönteisyydestä. (Green Building Council Finland, 2018).

Suomessa on yleisesti käytössä kaksi kansainvälistä luokitusjärjestelmää: LEED ja BREEAM. Näiden lisäksi käytössä on kansallinen RTS sekä pohjoismainen Joutsenmerkki. (Green Building Council Finland, 2018).

Päätös ympäristöluokituksen tavoittelemisesta on konkreettinen ja tärkeä hiilijalanjäljen ja ympäristövastuullisuuden ohjausmenetelmä. Valittu luokitus sekä luokituksen tavoiteltu ja saavutettu taso voivat toimia ympäristövastuullisuuden indikaattorina.

3.6.1 LEED

LEED (Leadership in Energy and Environmental Design)-luokitus on globaalisti käytetyin rakennusten ympäristöluokitusjärjestelmä, jonka vahvuus on yhtenäiset kriteerit ja vertailtavuus ympäri maailman. LEED on kehitetty Amerikassa, jonka vuoksi monien vaatimusten taustalla on amerikkalaisia käytäntöjä, mutta osaan on kuitenkin mahdollista soveltaa myös eurooppalaisia ja suomalaisia käytäntöjä. Rakennukset luokitellaan täytettyjen kriteerien perusteella neljään eri luokkaan: Certified, Silver, Gold ja Platinum. Sertifiointihakemuksen tarkastaa ja sertifikaatin myöntää US Green Building Councilin (USGBC) alainen Green Building Certification Inc. (GBCI).

3.6.2 BREEAM

BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Method) -luokitus perustuu yhteiseen eurooppalaiseen normistoon, jonka ansiosta se on johtava ympäristöluokitusjärjestelmä Euroopassa. BREEAM-sertifiointissa paikallinen arvioitsija tarkistaa vaatimustenmukaisuuden hankkeessa ja BRE myöntää paikallisen arvioitsijan raportin perusteella sertifikaatin laatuauditoinnin jälkeen. Rakennukset luokitellaan täytettyjen kriteerien perusteella viiteen eri luokkaan: Pass, Good, Very Good, Excellent ja Outstanding. BREEAM:ssa on uudis- ja korjausrakennuksille omat järjestelmänsä. (Green Building Council Finland, 2018).

3.6.3 RTS

RTS-ympäristöluokitus on kehitetty Suomen oloihin, ja siinä huomioidaan suomalaiset olosuhteet, lainsäädäntö ja kiinteistökannan monipuolisuus. RTS-ympäristöluokitus perustuu eurooppalaisiin standardeihin ja alan yhteisiin kansallisiin käytäntöihin. Luokituksen ylläpidosta ja auditoinneista vastaa Rakennustieto Oy. Rakennukset luokitellaan täytettyjen kriteerien perusteella 1–5 tähdellä. RTS-ympäristöluokituksella pystytään ohjaamaan kokoluokaltaan ja hanketyypiltään erilaisia hankkeita, joiden sisäilman laadulla on merkitystä. RTS-ympäristöluokitus soveltuu uudis- ja korjaushankkeisiin, ja siinä on kaksi erillistä kriteeristöä: toimitila- ja peruskorjaushankkeet sekä asuinrakennukset. (Green Building Council Finland, 2018).

3.6.4 Joutsenmerkki

Pohjoismaiden tunnetuin ja arvostetuin ympäristömerkki on Joutsenmerkki, jonka kiinnostavuus on vahvassa kasvussa. Joutsenmerkki soveltuu erityisen hyvin pohjoismaisiin olosuhteisiin, ja kriteerit ovat yhteneväiset kaikissa Pohjoismaissa. Joutsenmerkin tavoitteena on varmistaa ympäristöystävällisyys rakennuksen koko elinkaaren aikana sekä rakennuksen terveellinen ja turvallinen käyttö. Joutsenmerkin kriteeristö painottaa energiatehokkuutta, materiaalivalintoja, kemikaaleja, kierrätystä ja kierrätettävyyttä. Joutsenmerkin kriteereissä on pakollisia vaatimuksia energiankulutukselle ja materiaaleille, ja joutsenmerkittyjen tuotteiden käytöstä saa lisäpisteitä. Joutsenmerkin hakuprosessi on käynnistettävä jo suunnitteluvaiheessa, mutta vasta rakennuksen valmistuttua ja sertifiointielin Ympäristömerkintä Suomi Oy:n todettua rakennuksen täyttävän vaatimukset voidaan Joutsenmerkki myöntää rakennukselle. Joutsenmerkki voidaan myöntää uudiskohteissa pien- ja kerrostaloille, koulu- ja päiväkotirakennuksille sekä vapaaajan asunnoille. Peruskorjauskohteissa myös toimistorakennuksia voidaan sertifioida. (Green Building Council Finland, 2018).

3.6.5 WELL

WELL-standardi pyrkii yhdistämään parhaat käytännöt suunnittelussa ja rakentamisessa perustuen tieteellisiin terveys- ja hyvinvointitutkimuksiin. WELL-sertifioinnilla rakennus voi tukea positiivisia vaikutuksia ravintoon, kuntoiluun, uneen, mukavuuteen ja tuottavuuteen. Edellä mainitut asiat voidaan saavuttaa sisällyttämällä rakentamiseen strategioita, ohjelmia ja teknologioita, jotka tukevat aktiivista elämäntapaa ja vähentävät altistumista haitallisille kemikaaleille ja saasteille. Standardi ottaa huomioon kaikkiin 102 ominaisuutta, joiden perusteella määräytyy rakennuksen sertifikaatin taso. WELL-standardia voidaan soveltaa toimitiloille sekä julkisille rakennuksille. (Denos Living LLC, 2016). Panostamalla käyttäjien hyvinvointiin ja viihtyvyyteen voidaan parantaa myös yrityksen houkuttelevuutta ja tuottavuutta. (Raksystems Oy, luettu 25.5.2022).

WELL Performance Testing -auditoinnit koostuvat kokonaisvaltaisesta sisäolosuhteiden varmentamisesta pitäen sisällään mm. ilmanlaadun, lämpöolosuhteiden, vedenlaadun, valaistuksen ja akustiikan mittaukset. (Raksystems, luettu 25.5.2022).

4. HIILIJALANJÄLJEN LASKEMINEN

Rakennuksen hiilijalanjälki, eli rakennuksen elinkaaren kasvihuonekaasupäästöt, muodostuu eloperäisten ja fossiilisten polttoaineiden sekä maankäytön muutoksista aiheutuvien päästöjen summasta ja ilmoitetaan hiilidioksidiekvivalenttina painona. Rakennuksen hiilijalanjäljellä tarkoitetaan siis rakennuksen kasvihuonekaasupäästöjen kokonaismäärää rakennuksen elinkaaren aikana. Tiedot eri osatekijöistä löytyvät yleensä valmiina laskentaohjelmasta. Osatekijöitä ovat rakennustuotteiden valmistus ja vaihto, jätteenkäsittely, loppusijoitus, rakennustyömaatoiminnot (tai korjaustyömaatoiminnot), purkutyömaatoiminnot, tuotteiden ja materiaalien kuljetukset sekä rakennuksen käytön-aikainen energiankulutus.

Rakennustuotteiden ja -materiaalien tarvittavat päästötiedot tulisi löytää joko ympäristöselosteesta tai kansallisesta päästötietokannasta, mutta mikäli rakennuksessa on erittäin harvinaisia tuotteita, voidaan käyttää muuta yleisesti käytössä olevaa tietokantaa tai vertaisarvioitua tieteellisen tutkimuksen tietoa, mikäli se on alle 10 vuotta vanha ja soveltuu muuten Suomessa käytettäväksi. (Ympäristöministeriö, 2021).

Rakennuksen hiilijalanjäljen laskenta on monimutkaista ja toteutetaan yleensä suunnittelun loppuvaiheessa, kun EPD-dokumentit ovat saatavilla. Yksinkertaistuksilla, kuten käyttämällä geneerisiä päästötietoja, voidaan kuitenkin arvioida rakennuksen hiilijalanjälkeä suunnittelun aikaisemmissa vaiheissa. Aikaisen vaiheen hiilijalanjälkilaskennan tulisi tähdätä lopullisen hiilijalanjälkilaskennan kaltaisiin tuloksiin pienemmillä kustannuksilla ja vaivalla. (Giordano et al., 2021).

Cambridgen yliopiston teettämän tutkimuksen mukaan rakennusten elinkaaren hiilijalanjäljen laskennassa on merkittäviä eroja laskentatavasta riippuen. Vapaus laskentatavan ja reunaehtojen valinnassa johtaa vertailukelvottomiin tuloksiin. Tutkimuksen mukaan useimmissa laskelmissa vaiheet A1-3 (materiaalien tuotanto) oli otettu huomioon hyvin ja vaiheet A4-5 oli otettu huomioon osassa tarkasteltuja laskelmia, mutta elinkaaren myöhemmät vaiheet oli useimmiten jätetty laskelmien ulkopuolelle. (De Wolf et al., 2017).

4.1 Kansallinen päästötietokanta

Ympäristöministeriön vähähiilisyden laskentamenetelmän (2021 luonnos) mukaisesti hiilijalanjälkilaskennassa voidaan käyttää rakennustuotteiden ympäristöselosteita tai kansallista päästötietokantaa. (Ympäristöministeriö 2021).

Kansallinen päästötietokanta on Suomen ympäristökeskus SYKE:n ylläpitämä ja kehittämä ilmainen tietokanta, joka koostuu yleisimpien ja tyypillisimpien rakennustuotteiden keskimääräisistä päästötiedoista. Tietokannan tiedot perustuvat tuotteiden ympäristöselosteisiin, joiden pohjalta on tehty vertailua ja keskiarvojen laskentaa. Kansallinen päästötietokanta sisältää tuotetietojen lisäksi kuljetusten, rakentamisen ja jätteenkäsittelyn päästötietoja. (Suomen ympäristökeskus SYKE, päivitetty 2022).

Energiamuotojen päästökertoimet löytyvät myös kansallisesta päästötietokannasta. Alueellisia kaukolämmön tai kaukokylmän päästötietoja voidaan käyttää arvioinnissa lisätietona, mutta niillä ei tule korvata kansallisen päästötietokannan tietoja.

Kuljetusten päästötiedot löytyvät myös kansallisesta päästötietokannasta, mutta todelliset kuljetusmatkat tehtaalta työmaalle on mahdollista laskea myös tarkasti.

Työmaan energiankäytön päästöt löytyvät myös kansallisesta päästötietokannasta, mutta todelliset päästöt on mahdollista laskea myös todellisen mitatun energiankulutuksen avulla tarkasti. (Ympäristöministeriö 2021).

4.2 Arviointimenetelmät

Ympäristöministeriön vuonna 2019 julkaistu arviointimenetelmä sekä vuonna 2021 lausuntokierrokselle tullut luonnos uudesta arviointimenetelmästä perustuvat Euroopan komission laatimaan Level(s)-menetelmään, jonka pohjana ovat kestävästä rakentamisesta koskevat eurooppalaiset standardit sekä aiheeseen liittyvä tieteellinen tutkimus. Level(s)-menetelmän päätavoitteet ovat elinkaaren hiilijalanjäljen selvittäminen ja vähentäminen, resurssitehokas materiaalien käyttö, veden kulutuksen selvittäminen ja vähentäminen, terveellinen sisäilma ja terveelliset tilat, ilmastonmuutokseen sopeutuminen ja elinkaarikustannusten selvittäminen ja vähentäminen.

Arviointi rakennuksen vähähiilisydestä voidaan tehdä kaikille rakennuksille niin uudis-, kuin korjausrakennuskohteisiin. Arviointi on tarkoitus tehdä rinnakkain rakennuksen energiatehokkuuden arvioinnin kanssa.

Vähähiilisyden arviointi on tarkoitus tehdä rakennussuunnittelun aikana, jolloin lähtötiedot materiaaleista ja energiantarpeesta ovat riittävällä tasolla. Vähähiilisyttä voidaan

arvioida myös ennen rakennussuunnittelua, mm. hiilijalanjälkitavoitteiden asettamiseksi, mutta arviointimenetelmä ei käsittele hiilijalanjälkitavoitteiden asettamista. (Lahtinen, 2019).

Vuonna 2021 ympäristöministeriö julkaisi päivitetyn vähähiilisuuden arviointimenetelmän luonnoksen koekäyttöön. Uudessa luonnoksessa keskeisiä muutoksia vuoden 2019 versioon ovat rakennuspaikan aiheuttamien päästöjen erottaminen rakennuksen päästöistä, arviointijakson vakiointi 50 vuoden pituiseksi, väliaikaisten ja siirrettävien rakennusten arvioinnin tarkennukset, eloperäistä hiiltä sisältävien tuotteiden hiilijalanjäljen ja hiilikädenjäljen arvioinnin tarkennukset, hiilikädenjäljen arvioinnin tarkennukset sekä arviointiin sisältyvien rakennusosien, taulukkoarvojen ja energiamuotojen päästökertoimien päivitykset ja siirtäminen osaksi kansallista päästötietokantaa. Arviointimenetelmä ohjeistaa ilmoittamaan rakennuksen ja rakennuspaikan hiilijalanjäljen taulukkomuotoisena ja elinkaaren vaiheisiin jaoteltuna. Elinkaaren vaiheista lisää kappalessa 4.3. (Ympäristöministeriö 2021).

4.3 Rakennuksen elinkaaren vaiheet

Rakennuksen hiilijalanjälkeä arvioitaessa rakennuksen elinkaari on jaettu vaiheisiin A-C ja elinkaaren ulkopuoliseen vaiheeseen D. Vaihe A pitää sisällään vaiheet ennen rakennuksen käyttöä, vaihe B rakennuksen käytön ajan, vaihe C käytön jälkeen ja vaihe D elinkaaren ulkopuoliset positiiviset vaikutukset, jotka otetaan huomioon hiilikädenjälkeä arvioitaessa. Elinkaaren vaiheista käytetään yleisesti myös nimitystä moduuli (esim. moduulit A1-3, tuotteiden valmistus).

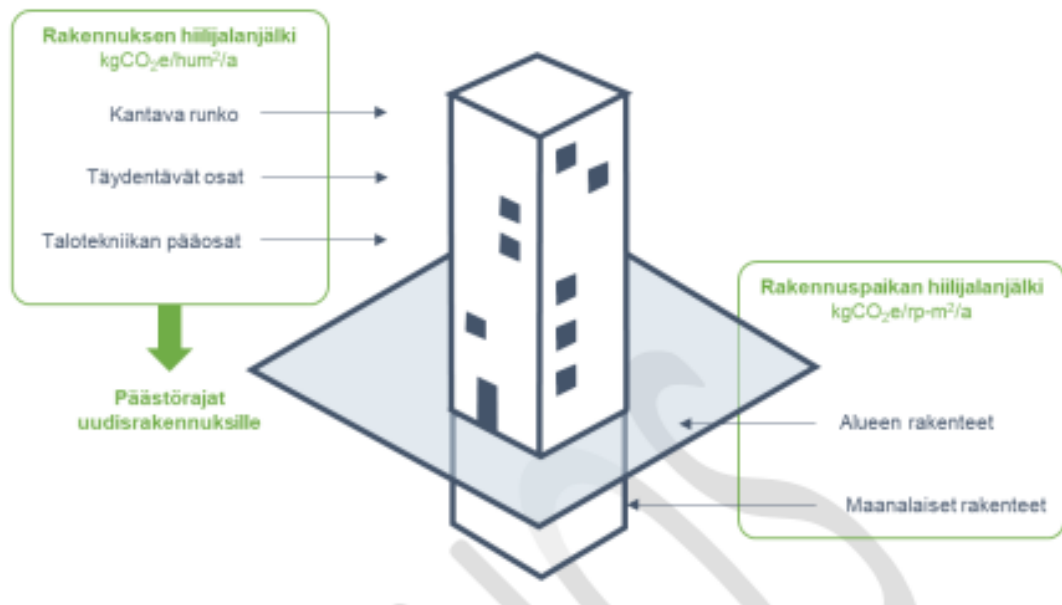
Vaihe	Rajaus	Peruste	
A. Ennen käyttöä	A1–3 Tuotteiden valmistus	Arvioidaan	Rakennusmateriaalien ilmastovaikutukset ovat tutkimusten mukaan merkittäviä. Niiden määrä voidaan arvioida tarkasti suunnitteluvaiheessa.
	A4 Kuljetukset työmaalle	Arvioidaan	Vaikka kuljetusten vaikutus elinkaaren hiilijalanjälkeen ei ole kovin suuri, se voidaan kohtuullisen luotettavasti arvioida. Kuljetusten vähentämisestä on myös muita hyötyjä ympäristölle ja yhteiskunnalle.
	A5 Työmaa-toiminnot	Arvioidaan	Rakennustyömaiden vähähiilisyyden parantamiseksi tehdään toimenpiteitä. Näiden toimien vaikuttavuuden tekeminen näkyväksi edellyttää rakennushankkeissakin arviointia.
B. Käytön aikana	B1 Tuotteiden käyttö	Ei arvioida	Vaikutus on hyvin vähäinen ja arviointi hankalaa. Koskisi kasvihuonekaasupäästöjen arvioinnissa lähinnä talotekniikan laitteiden mahdollisia kylmäainevuotoja.
	B2 Kunnossapito	Ei arvioida	Vaikutus on vähäinen, eikä suunnitteluvaiheessa voida tehokkaasti vaikuttaa kunnossapidossa käytettäviin laitteisiin ja tuotteisiin.
	B3 Korjaukset	Ei arvioida	Odottamattomista rikkoontumisesta johtuvia korjaustarpeita on hankala arvioida riittävän luotettavasti.
	B4 Rakennustuotteiden vaihdot	Arvioidaan	Rakennustuotteiden tekniseen käyttöikänsä liittyvästä kulumisen ja vaihtotarve voidaan arvioida kohtuullisen luotettavasti. Lisäksi vaihtojen sisällyttäminen on perusteltua, jotta vältettäisiin osaoptimoimia valitsemalla vähähiilisiä mutta lyhytikäisiä rakennustuotteita.
	B5 Laajamittaiset korjaukset	Ei arvioida uusissa rakennuksissa	Laajamittaisten korjausten yhteydessä tehdään yleensä merkittäviä muutoksia rakenteisiin, talotekniikkaan ja jopa tilajärjestelyihin. Tällaisia muutoksia on erittäin vaikea arvioida ennakoivasti. Tämän vuoksi laajamittaisiin korjaushankkeisiin tehdään erillinen vähähiilisyyden arviointi.

	B6 Energian käyttö	Arvioidaan	Energian kulutus on keskeinen rakennuksen vähähiilisyyteen vaikuttava tekijä.
	B7 Veden käyttö	Ei arvioida	Veden käytön vaikutus rakennuksen hiilijalanjälkeen on vähäinen, mutta arviointi vie aikaa. Käyttöveden lämmittämisestä aiheutuvan energian hiilijalanjälki sisältyy kohdan B6 arviointiin.
	B8 Käyttäjien toimet	Ei arvioida	Käyttäjien toimien arviointi edellyttäisi hankekohtaisesti tehtäviä skenaarioita, joiden tarkkuutta voi olla vaikea varmistaa.
C. Käytön jälkeinen	C1 Purkutyöt	Arvioidaan	Rakennuksesta purettavien materiaalien määrä tiedetään tarpeeksi tarkasti suunnitteluvaiheessa. Käytön jälkeisten vaiheiden lukeminen mukaan elinkaariarviointiin mahdollistaisi kiertotaloutta edistävien suunnitteluratkaisujen avulla saavutettavien hyötyjen arvioinnin.
	C2 Kuljetukset käsittelyyn	Arvioidaan	
	C3 Jätteenkäsittely	Arvioidaan	
	C4 Loppusijoitus	Arvioidaan	
Elinkaaren ulkopuolel	D Muut vaikutukset	Arvioidaan osana hiilijalanjälkeä	Kiertotalouden ja muiden ilmastoratkaisujen hyötyjen arviointi voidaan tehdä EN- ja EN ISO-standardien pohjalta. D-moduulin arviointi sisältyy myös muissa pohjoismaissa käyttöön tuleviin arviointimenetelmiin.

Kuva 3. Vuoden 2021 arviointimenetelmäluonnoksessa arvioitavat elinkaaren vaiheet. (Ympäristöministeriö, 2021).

Kuvassa 3 on esitetty vuoden 2021 vähähiilisyden arviointimenetelmäluonnoksessa arvioitavat elinkaaren vaiheet ja arvioinnin ulkopuoliset vaiheet. Arviointi tehdään vain rakennuksen ensimmäisen 50 vuoden ajalle, sillä pitkälle tulevaisuuteen tehtävien arviointien epätarkkuus kasvaa suureksi. Tehtäessä arviointia väliaikaiselle tai siirrettävälle rakennukselle voidaan käyttää lyhyempää kuin 50 vuoden arviointijaksoa. (Ympäristöministeriö 2021).

Vuoden 2021 vähähiilisyden arviointimenetelmäluonnoksessa rakennuspaikan hiilijalanjälki ja rakennuksen hiilijalanjälki esitetään erillisinä lukuina.



Kuva 4. Rakennuksen ja rakennuspaikan hiilijalanjäljen erottaminen toisistaan. (Ympäristöministeriö 2021).

	Rakennus	Rakennuspaikka
Alueosat	–	1.1.1 Maaosat 1.1.2 Tuennat 1.1.3 Päälysteet 1.1.5 Alueen rakenteet
Rakennusosat	1.2.2 Alapohja 1.2.3 Runko 1.2.4 Julkisivut, ovet ja ikkunat 1.2.5 Ulkotasot ja parvekkeet 1.2.6 Kattorakenteet	1.2.1 Perustukset
Tilaosat	1.3.1 Jako-osat (väliseinät, ovet, portaat) 1.3.2 Tilapinnat (lattiat, sisäkatot, seinät) pintakäsittelyineen 1.3.3 Tilavarusteet (kiintokalusteet, keittiölaitteet) 1.3.4.2 Hormit ja tulisijat 1.3.5 Tilaelementit (mm. kylpyhuonemuodulit)	–
Talotekniikka	<ul style="list-style-type: none"> • Lämmitysjärjestelmän pääosat • Vesi- ja viemärijärjestelmän pääosat • Ilmastointijärjestelmän pääosat • Jäähdytysjärjestelmän pääosat • Sprinklerijärjestelmän pääosat • Sähköjärjestelmän pääosat • Hissit ja liukuportaat 	Rakennuksen ulkopuolella sijaitsevat talotekniikan osat, jotka eivät palvele rakennusta vaan rakennuspaikkaa (esim. aluevalaistus tai ulkokatosten sähköjärjestelmä)

Kuva 5. Rakennuksen ja rakennuspaikan osien erottelu arviointiin. (Ympäristöministeriö 2021).

4.4 Hiilijalanjäljen kompensointi

Pyrittäessä pienempään hiilijalanjälkeen, hiilineutraaliksi tai jopa hiilinegatiiviseksi voidaan rakentamisesta aiheutuvia kasvihuonekaasupäästöjä kompensoida positiivisilla ilmastoteoilla. Ensisijainen keino hiilijalanjäljen pienentämiseksi on kasvihuonekaasupäästöjen vähentäminen, mutta kaikkia päästöjä ei aina ole mahdollista tai taloudellisesti järkevää poistaa, vaan jäljelle jäävä osuus kannattaa kompensoida luomalla biogeenisiä hiilivarastoja, kuten metsää. Puun yhteyttämisreaktiossa puuhun varastoituu ilmakehästä hiilidioksidia, joka säilyy puussa pitkään. Puun kuivapainosta noin puolet on ilmakehästä sitoutunutta hiiltä.

5. KASVIHUONEKAASUPÄÄSTÖJEN OHJAUS

Kasvihuonekaasupäästöjä lasketaan samoilla menetelmillä kuin kustannuksia, mutta yksikkönä on CO₂e valuutan sijasta. CO₂e eli hiilidioksidiekvivalentti on hiilijalanjäljen yksikkö, joka kuvaa eri kasvihuonekaasupäästöjen ilmakehää lämmittävää vaikutusta muunnettuna hiilidioksidin vastaavaksi vaikutukseksi ilmakehässä. Hiilidioksidiekvivalentti ilmoitetaan rakentamisessa yleensä tonneissa. (Green Building Council Finland, 2020).

Kustannuksia ohjattaessa valuutta on kuitenkin konkreettisempi, sillä tilaajalla on yleensä rajallinen budjetti hankkeen toteuttamiselle, kun taas kasvihuonekaasupäästöjen määrää voi olla vaikeaa hahmottaa. Organisaatiot pystyvät hahmottamaan maksukykynsä rajat, mutta päästöjen rajojen hahmottaminen on vasta syntymässä. Ilmaston lämpenemisen huoli on yhteinen, mutta yhteisen huolen kantaminen eri organisaatioiden kesken on vaikeaa ilman tarvittavaa tietoa ja taitoa.

Hiilibudjetin määrittämisessä suositetaan prosentuaalista vähentämistavoitetta hankesuunnitteluvaiheen hiilijalanjälkilaskelmasta. Kunnianhimoinen hiilibudjetti voi myös edistää uusien, innovatiivisten vähähiilisten ratkaisujen tekemistä, mikäli hiilibudjetti nähdään motivoivana.

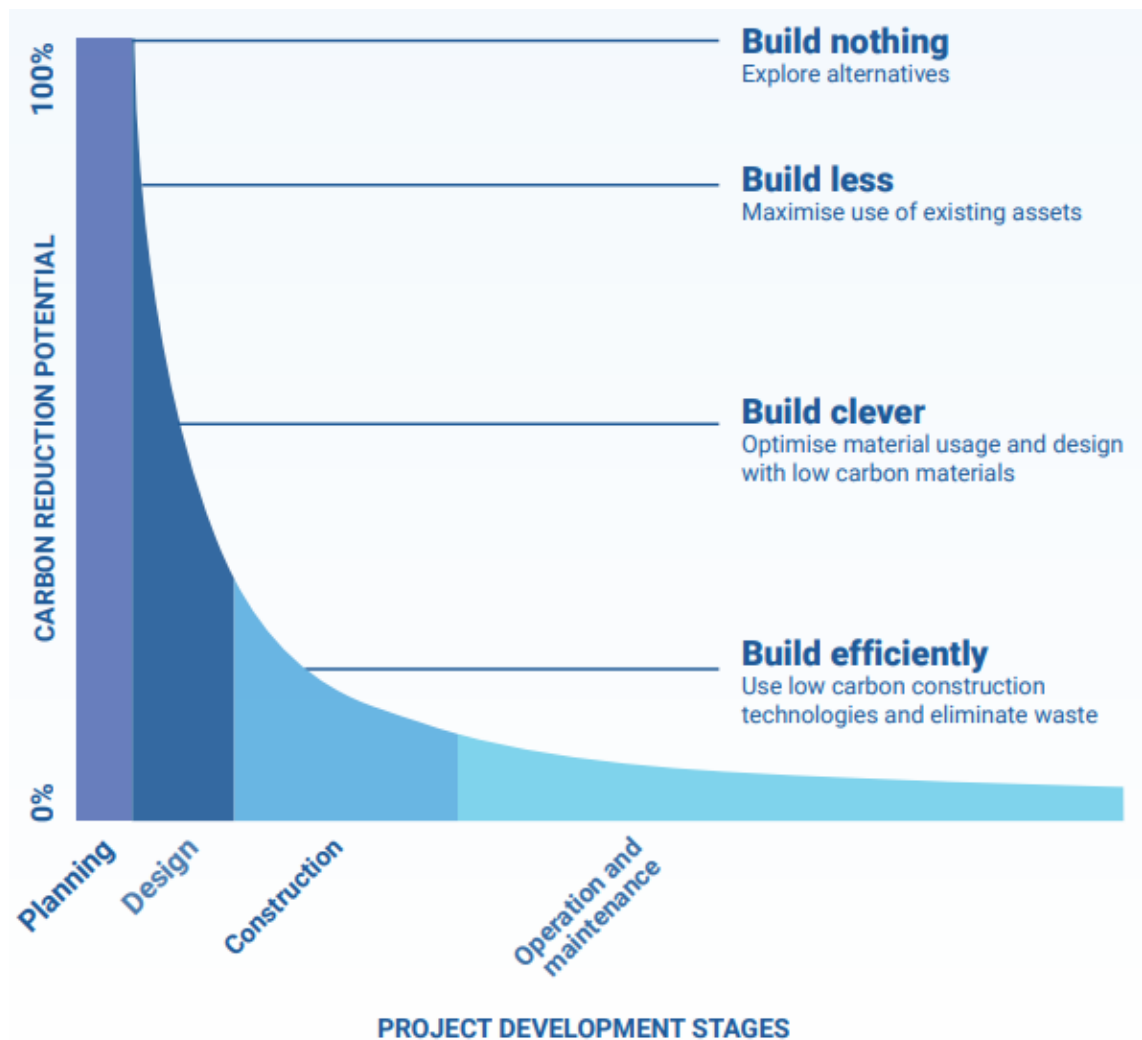
Tehokkaita keinoja rakennuksen hiilijalanjäljen pienentämiseksi ovat mm. rakennuksen energiankulutuksen minimointi, lämmitysjärjestelmien vertailu, resurssitehokas materiaalien käyttö ja kierrätys, vähäpäästöisten materiaalien suosiminen ja uusiutuvan energian tuottaminen tai sen ostaminen verkosta. (Ahola, Liljeström, 2018).

Gävlen yliopiston sekä Kuninkaallisen teknillisen korkeakoulun teettämässä tapaustutkimuksessa toimistorakennuksen aikaisen vaiheen suunnittelunohjauksella saavutettiin lähes 50 % pienennys elinkaaren hiilijalanjälkeen alkutilanteeseen verrattuna. Merkittävimmät päästövähennykset saatiin päästöttömän sähkön ostamisella, korvaamalla betonilaatat CLT-laatoilla (Cross Laminated Timber), ikkunoiden U-arvojen parantamisella, rakennuksen eristämisen parantamisella ja asentamalla matalan energiankulutuksen valaistus. Vaihtamalla betonilaatat CLT-laatoiksi saavutettiin 25 % vähennys materiaaleihin sitoutuneista päästöistä. (Wallhagen, Glaumann, Malmqvist, 2011).

5.1 Massoittelu

Massoittelulla tarkoitetaan arkkitehtisuunnittelussa rakennuksen muodon ja toimintojen sijainnin määrittämistä yhtäaikaaisesti.

Rakennuksen tuottamat kasvihuonekaasupäästöt määräytyvät pitkälti suunnittelun alkuvaiheessa, kun rakennuksen käyttötarkoitus, muoto ja materiaalit määritetään. Kasvihuonekaasupäästöjen ohjauksen tulisi painottua tarveselvitykseen ja hankesuunnitteluvaiheeseen ja jatkua suunnittelun läpi. Massoittelulla, jota tehdään hankesuunnitteluvaiheessa, voidaan tehokkaasti vaikuttaa rakennuksen hiilijalanjälkeen, sillä tehokkaalla massoittelulla vähennetään raaka-ainetarvetta sekä kasvihuonekaasupäästöjä ja toisaalta tehottomalla massoittelulla tuhlaaan raaka-aineita ja rakennetaan turhaan, mikä johtaa ylimääräisiin kasvihuonekaasupäästöihin. Massoittelun todellinen merkitys hiilijalanjälkeen on suuri, mutta onnistuneen massoittelun avulla kohtuullistetut rakennusosien määrät ja järkevät käytävien määrät eivät toistaiseksi näy hiilijalanjälkilaskelmissa.



Kuva 6. Päästövähennyspotentiaali rakennusprojektin eri vaiheissa. (Adams et al., 2022).

Massoittelusta kerrotaan lisää kappaleessa 6.

5.2 Rakennusosien optimointi

Suunnittelun ohjauksessa tulisi pyrkiä optimoimaan myös rakenteita ja pohtia eri materiaalivaihtoehtojen vaikutusta kasvihuonekaasupäästöihin. Optimointi ja materiaalivaihtoehtojen vertailu tulisi aloittaa määrittään suurimmista ja paljon päästöjä aiheuttavista materiaaleista ja rakennusosista. Green Building Council Finlandin toimenpide-ehdotuksissa rakennuttajille on esitetty EPD ympäristöselosteiden vaatiminen materiaaleista, mikä helpottaisi myös materiaalivaihtoehtojen vertailua. EPD-dokumenttien vaatiminen merkittävimmistä materiaaleista tulisi aloittaa vuonna 2023, ja noin vuonna 2030 EPD-dokumentit tulisi vaatia kaikista materiaaleista. (Tähkänen, Tähtinen, 2021).

5.2.1 U-arvojen parantaminen

Energiatehokkuutta voidaan parantaa pienentämällä rakennuksen vaipparakenteiden U-arvoja kiinnittämällä huomiota vaipparakenteisiin ja niiden eristemateriaaleihin ja eristepaksuuksiin. U-arvot saadaan parhaimmalle tasolle, kun eristepaksuutta kasvatetaan niin paljon, kuin on elinkaarikustannusten kannalta järkevää. Eristeitä ja eristepaksuuksia vertailtaessa tulee ottaa myös huomioon eristemateriaalien päästöt. Esimerkiksi saman tiheyden kivivillaeristeellä on yleensä hieman lasivillaeristettä pienemmät päästöt, ja EPS-eristeen päästöt ovat yleensä XPS-eristettä pienemmät. Päästöt voivat kuitenkin vaihdella merkittävästi tuoteryhmien sisällä mm. tehtaan käyttämän energiamuodon ja kuljetusmatkojen etäisyyden johdosta. (Ahola, Liljeström, 2018).

5.2.2 Ilmanvaihto

Rakennuksen ilmanvaihto on energiatehokkuuden kannalta merkittävä tekijä. Koneellisessa ilmanvaihdossa huoneistokohtaisella ohjausmahdollisuudella voidaan saada säästöä energiankulutuksessa ja kasvihuonekaasupäästöissä, kun ilmanvaihtoa voidaan tehostaa ja pienentää tarpeen mukaan.

Ilmanvaihdon lämmöntalteenotto vähentää tuloilman lämmitystarvetta, joka puolestaan vähentää energiankulutusta. Ilmanvaihdon lämmöntalteenoton vuosihyötysuhde kuvaa poistoilmasta talteen otetun lämmitysenergian hyödyntämistä tuloilman lämmittämisessä, ja vuosihyötysuhteen optimoinnilla voidaan pienentää ilmanvaihdon kasvihuonekaasupäästöjä. (R. Ahola, K. Liljeström, 2018)

5.2.3 Ikkunat

Ikkunoiden ominaisuudet, määrä ja sijainti vaikuttavat suoraan rakennuksen E-lukuun. Energiatehokkaiden ikkunoiden tulisi maksimoida sisään tuleva valo, estää kesällä valosta aiheutuva sisäilman kuumeneminen, estää talvella lämmön karkaaminen ja mak-

simoida valon tuoma lämpöenergia. Erilaisilla ikkunatyypeillä on myös erilaiset käyttöiät, joka tulee huomioida hiilijalanjälkeä vertailtaessa. Esimerkiksi alumiini-ikkunoiden käyttöikä on yleensä 60 vuotta, kun taas puualumiini-ikkunat oletetaan uusittavan ker-
 ran 60 vuoden aikana. (Ahola, Liljeström, 2018). Ikkunoiden materiaalia sekä U- ja G-
 arvoja tulisi tarkastella kustannustehokkuuden lisäksi myös rakennuksen elinkaaren hii-
 lijalanjäljen osalta.

5.2.4 Vihreä betoni

Betonin valmistamisessa sideaineena käytetään perinteisesti sementtiä. Sementtiklink-
 kerä valmistetaan polttamalla kiertoilmauunissa noin 1450 °C lämpötilassa kalkkikiveä ja
 muita mineraalisia raaka-aineita. Sementin valmistaminen on erittäin energiaintensii-
 vistä, ja kalkkikivestä irtoaa sitä kuumennettaessa huomattavasti hiilidioksidia. (Betoni-
 teollisuus Ry, viitattu 27.06.2022)

Vihreä eli vähähiilinen betoni, on betonituote, jonka kasvihuonekaasupäästöjä on pie-
 nennetty korvaamalla osa betonin sementistä muilla sideaineilla. Vihreän betonin lujuu-
 den kehittyminen on tavanomaista betonia hitaampaa, mutta loppulujuus on tavan-
 omaista vastaava. Vihreää betonia on saatavilla myös nopeammin kovettuvana, ja hiili-
 dioksidipäästöjen osalta on useita eri luokkia. (Rudus Oy, viitattu 27.6.2022).

Korvaamalla tavanomainen betoni vihreällä betonilla kokonaan tai osittain voidaan vä-
 hentää rakennuksen elinkaaren kasvihuonekaasupäästöjä. Vihreän betonin korkeampi
 hinta ja hitaampi lujuudenkehitys ovat kuitenkin hidastaneet sen yleistymistä. Hitaampi
 lujuudenkehitys vaatii rakentamisen aikataulusuunnittelulta lisäpanostusta, ellei hank-
 keen läpimenoaikaa pidennetä.

Vihreän betonin käyttöä olisi yleissuunnitteluvaiheessa hyödyllistä harkita. Vihreän be-
 tonin kustannuksia, aikataulun luomia haasteita ja pienentyntä hiilijalanjälkeä tulisi
 verrata tavanomaiseen betoniin ja tehdä vertailun tulosten perusteella päätös käyttää
 tai olla käyttämättä vihreää betonia.

5.2.5 Valaistus

Energiatehokas valaistus edellyttää energiatehokasta valaistustapaa, tarpeenmukaista
 valaistuksen käyttöä ja sopivia tiloja. Valaistustapana LED-valaisimet ovat energiate-
 hokkaita. Tarpeenmukainen käyttö tarkoittaa sopivaa valon määrää ja sen ohjaamista
 (automaatiikalla tai manuaalisesti) ja tiloilla mm. pintojen emissiivisyyttä, tilan muotoja ja
 luonnonvalon lähteitä. Energiatehokkaalla valaistuksella voidaan vähentää rakennuk-
 sen ostoenergiankulutusta ja sitä kautta kasvihuonekaasupäästöjä.

5.3 Kompensointi

Rakennuksen hiilijalanjäljen pienentämisen tulisi painottua ensisijaisesti kasvihuonekaasupäästöjen pienentämiseen ja biogeenisten hiilivarastojen luomiseen. Kompensoinnilla voidaan saavuttaa rakennukselle hiilineutraalius, mutta kompensointi ei korvaa päästöjen vähentämistä tai biogeenisiä hiilivarastoja. Mikäli kompensointia kuitenkin tehdään, tulisi kompensointitoimenpiteiden olla yleisesti hyväksytyjä ja läpinäkyviä.

5.4 Tarvittavat lähtötiedot

Kasvihuonekaasupäästöjen laskemiseksi tarvitaan materiaalien määrät, tiedot materiaalien kuljetuksesta (kuljetettava etäisyys, käytettävä logistiikkalusto), työmaan käyttämä energia, käytön ja ylläpidon tarpeet sekä tieto elinkaaren lopulla tapahtuvista purku- ja kierrätystoimenpiteistä. Geneeriset arvot materiaalien kasvihuonekaasupäästöille saadaan kansallisesta päästötietokannasta tai materiaalien EPD-dokumenteista, mutta harvinaisille materiaaleille ja tuotteille joudutaan tekemään arvioita. Ylläpidossa tulee huomioida rakennusosien käyttöikä, sillä joitakin rakennusosia joudutaan uusimaan tai päivittämään rakennuksen käyttöiän aikana (esimerkiksi bitumikermikate, jonka käyttöikä on yleensä 20–40 vuotta). (Bionova, 2017).

5.5 Hiilijalanjälkilaskelmat

Kasvihuonekaasupäästöistä tehdään nykyään hiilijalanjälkilaskelmia, ja ympäristöministeriön tavoitteena on, että hiilijalanjälkeä ohjataan lainsäädännöllä vuoteen 2025 mennessä. Vaikuttavuuden arvioinnin perusteella säädösohjaus tulisi koskemaan ensisijaisesti uudisrakentamiseen ja kytkeytyisi rakennuksen käytönaikaisen energiankulutuksen ohjaukseen. (Raivio et al., 2020).

Hiilijalanjälkilaskelma tehdään toistaiseksi yleensä vasta siinä vaiheessa, kun rakennus on jo pitkälle suunniteltu, minkä vuoksi hiilijalanjälkilaskenta ei ole proaktiivista eikä edes reaktiivista, vaan ainoastaan (konsultin laskema) laskettu lukema, jolle ei ole vertailuarvoa. Hiilijalanjälkeä ohjattaessa pienemmäksi tulisi tehdä vertailuja merkittävien rakennusmateriaalien ja suunnitteluratkaisujen välillä. Esimerkiksi runkoratkaisu, ulkoseinätyyppi, ilmanvaihdon toteutus (hajautettu vs. keskitetty, paikallinen ohjausmahdollisuus ja lämmöntalteenoton vuosihyötysuhde) voivat vaikuttaa merkittävästi hiilijalanjäljen suuruuteen.

Simuloimalla hiilijalanjälki ennen hankesuunnitteluvaiheen tärkeitä päätöksiä voidaan vaikuttaa hiilijalanjäljen suuruuteen. Rakennushankkeen simulointimalli määrittää kaikkien materiaalien määrät, materiaalien kuljetuksen päästöt, työmaan energiankäytön ja

ylläpidon jo ennen rakennuksen yksityiskohtaista suunnittelua. Rakennushankkeen simulointimallin avulla geneerisillä ratkaisuilla toteutetun rakennuksen kasvihuonekaasupäästöt voidaan määrittää jo hankesuunnitteluvaiheessa, mikä mahdollistaa myös hiilibudjetin laatimisen ja proaktiivisen kasvihuonekaasupäästöjen ohjauksen, kun päätösten vaikutukset hiilijalanjälkeen saadaan konkreettisina CO₂e-arvoina.

5.6 EU-taksonomia

EU-taksonomia on luotu osaksi Euroopan kehityksen vihreän ohjelman kestäviä rahoitusmarkkinoita koskevaa toimenpidekokonaisuutta. Taksonomia on luokittelujärjestelmä, jonka on tarkoitus luoda vertailukelpoinen ja yhtenäinen tapa rahoituskohteiden ja yritysten ilmastotoimien arviointiin.

Taksonomian tarkoitus on helpottaa rahoituksen saamista ympäristöystävällisille hankkeille ja toisaalta vaikeuttaa rahoituksen saamista ympäristöä paljon kuormittaville kohteille, jolloin uhka kalliimmasta rahoituksesta kannustaisi tekemään ympäristöystävällisempiä valintoja hankkeessa.

EU-taksonomia-asetuksen kuusi päätavoitetta ovat ilmastonmuutoksen hillintä, ilmastonmuutokseen sopeutuminen, vesi- ja merivarojen suojeleminen, kiertotalouden edistäminen, ympäristön pilaantumisen ehkäiseminen sekä ekosysteemien ja luonnon monimuotoisuuden suojeleminen. Taksonomian mukaan toiminnan tulisi tukea ainakin yhtä kuudesta päätavoitteesta sekä Do No Significant Harm (DNSH)-periaatetta, eli yhteen tavoitteeseen pyrkiminen ei saisi merkittävästi haitata muiden tavoitteiden toteutumista. 1.1.2022 voimaan tullut ensimmäinen taksonomia-asetus määrittelee tarvittavat teot ilmastonmuutoksen hillinnän ja ilmastonmuutokseen sopeutumisen osalta. (M. Tähkänen, L. Tähtinen, 2021).

Taksonomiaa tarvitaan, koska tarvitsemme luotettavia työkaluja tukeaksemme yrityksiä ja sijoittajia siirtymässä kohti ilmastoneutraaliutta ja kestävää taloutta. EU-taksonomia on yksi väline, joka muuttaa ilmasto- ja ympäristötavoitteet selkeiksi kriteereiksi ja luo yhteistä kieltä kestävän kehityksen ympärille. Taksonomia auttaa myös viherpesun ehkäisyssä, sillä taksonomian on tarkoitus olla läpinäkyvää. Taksonomia pyrkii myös mahdollistamaan yritysten ja sijoittajien toiminnan laajentamista vihreisiin hankkeisiin, jotka ovat välttämättömiä EU:n ilmastotavoitteiden saavuttamiseksi. (Euroopan komissio, 2021).

6. RAKENNUSTEN MASSOITTELUN VAIKUTUS KASVIHUONEKAASUPÄÄSTÖIHIN JA RAAKA-AINEIDEN KULUTUKSEEN

Raaka-aineiden kulutusta rakennuksissa voidaan vähentää parantamalla tilatehokkuutta, kunhan rakennuksen toiminnallisuus säilytetään. (Ruuska, Häkkinen, 2014).

Rakennuksen massan tulisi siis olla kompakti, jolloin käytäviä, portaita ja muita toisarvoisia tiloja olisi mahdollisimman vähän. Turhat tilat eivät siis luo käyttäjälle lisäarvoa, mutta niitä rakennettaessa ja käytettäessä syntyy siitä huolimatta kasvihuonekaasupäästöjä.

Suunnitteluvaiheessa hyvät suunnittelukäytännöt, toimivat suunnitteluratkaisut ja soveltuvat tekniikat, kuten purettavaksi suunnittelu, on havaittu erittäin tärkeiksi tekijöiksi materiaaleihin sitoutuneen hiilidioksidin vähentämisessä. (Pomponi, Moncaster, 2016). Artikkelissaan Acquaye ja Duffy esittävät, että paremmalla suunnittelulla voitaisiin vähentää materiaaleihin sitoutunutta hiilidioksidia jopa 20 %. (Acquaye, Duffy, 2010).

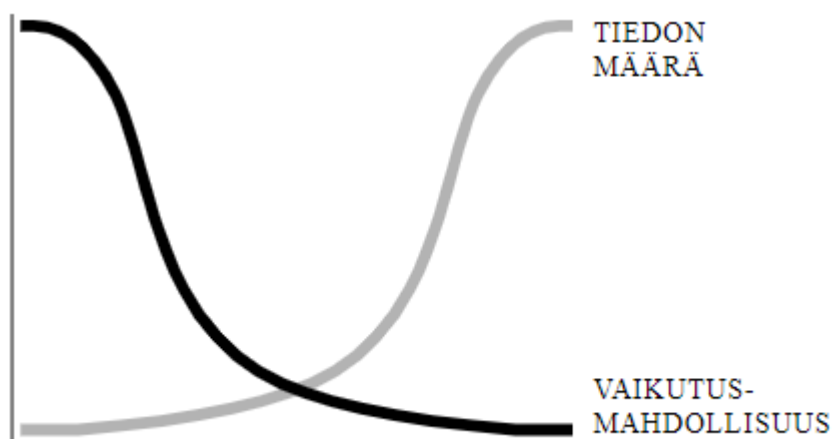
Rakennuksen suunnittelun alkuvaiheessa rakennuksen lopullista muotoa ja sisältöä ei voida luotettavasti arvata, vaan vaihtoehtoja jokaiselle tarkennukselle on lukuisia. Rakennuksen suunnittelu voidaan jakaa kahteen pääpiirteeseen: muodon ja toimintojen suunnitteluun sekä rakennusosien suunnitteluun. Suunnittelu alkaa selvittämällä asiakkaan rakennukselta haluamien toimintojen yhteyksiä ja massoittelemalla rakennus sen ympäristöön sopivaksi. Rakennuksen toiminnallisuus voidaan toteuttaa lukuisilla eri tavoilla, ja jokaisella tavalla on oma hiilijalanjälkensä. Mikäli pyydetään yhtä kohdetta varten sadalta eri arkkitehdiltä luonnokset, saadaan sata erilaista suunnitteluratkaisua.

Kun suunnitellaan rakennuksen muotoa ja toiminnallisuutta, rakennusosia ei suunnitella samanaikaisesti. Kun rakennuksen konsepti eli tilat ja muoto on päätetty, suunnittelu alkaa keskittymään rakennusosien suunnitteluun, joka jatkuu rakennuksen valmistumiseen asti. Rakennuksen muodon ja toiminnallisuuden suunnittelun vaihe määrittää rakennusosien jakautumisen ja määrät, esimerkiksi 1-kerroksisena toteutetussa rakennuksessa on enemmän katto- ja alapohjarakenteita, mutta vähemmän portaita, kuin 2-kerroksisena toteutetussa vastaavan huoneistoalan rakennuksessa. Toisaalta rakennusosien määrittelyn vaihe määrittää rakennusosien yksityiskohdat.

Nopean palautteen saaminen rakennusosien tarkoista määristä ja yksityiskohdista vaikuttaisi olevan saavuttamattomissa edellä mainitulla perinteisellä menetelmällä, sillä rakennuksen muoto ja toiminnallisuus pitää olla määriteltynä ennen rakennusosien suunnittelua. (Pennanen et al., 2011).

Rakennushankkeen simulaatiomalli tarjoaa ratkaisun rakennuksen hiilijalanjäljen ohjaamiseen jo rakennuksen muotoa ja toimintoja suunnitellessa. Rakennushankkeen simulaatiomalli ottaa syötteenä projektin perustiedot, kiinteistöön halutut toiminnot, kaavamääräykset ja tontin olosuhteet. Tämän jälkeen simulaatiomalli simuloi rakennuksen tiloineen ja simuloi rakennuksen muodon, rakennuksen osat, kokonaispinta-alan, kustannukset ja hiilijalanjäljen. Simulaatio ottaa huomioon rakennushankkeen kaikki osat ja vaiheet alusta rakennuksen valmistumiseen. Simulaatiomallia voidaan tämän jälkeen muokata eri parametrejä muuttamalla, jolloin voidaan tehokkaasti vertailla eri ratkaisujen vaikutuksia kustannuksiin, kokonaispinta-alaan ja hiilijalanjälkeen. Ketterä simulointimallin muokkaaminen ja tulosten tarkastelu mahdollistavat hiilijalanjäljen ohjaamisen jo aikaisessa vaiheessa.

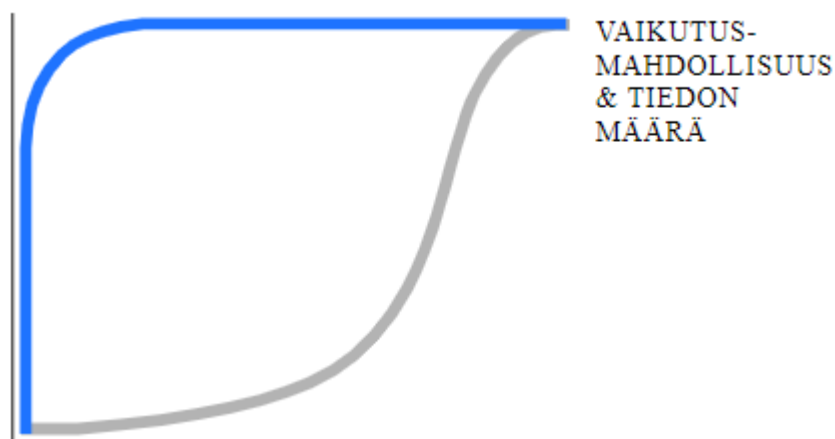
Rakennushankkeen simulaatiomalli pyrkii mallintamaan rakennuksen juuri kuten suunnittelijat sen suunnittelisivat ja rakentajat rakentaisivat hyödyntäen lähes 100 000 mitoitusalgoritmia, jotka ovat kytkettynä toisiinsa. Rakennuksen hinta- ja hiilijalanjälkitiedot lasketaan suurten päivittyvien hinnasto- ja päästötietokantojen avulla, jolloin rakennuksen tärkeimmät tunnusluvut saadaan automaattisesti, eikä erillistä tulosten arviointia tarvita. Uudet hinta- ja hiilijalanjälkitiedot voidaan päivittää malliin ilman, että kiinteistön kuvausta tarvitsee muokata.



Kuva 7. Vaikutusmahdollisuudet ja tiedon määrä rakennushankkeen aikana ilman simulaatiomallia. (Haahtela, viitattu 10.6.2022).

Tyypillisesti rakennushankkeen alkuvaiheessa vaikutusmahdollisuudet ovat suuret ja tiedon määrä vähäinen. Rakennushankkeen simulaatiomalli kuitenkin nostaa tiedon määrää huomattavasti hankkeen alkuvaiheessa, jolloin alkuvaiheen tärkeitä päätöksiä voidaan perustaa tietoon ja ohjata proaktiivisesti tarkastelemalla päätösten vaikutusta hintaan, kokonaispinta-alaan ja hiilijalanjälkeen. Päätösten vaikutusten hahmottaminen kustannusten, kokonaispinta-alan ja hiilijalanjäljen kannalta voi auttaa tilaajaa tekemään tilaa, luonnonvaroja, kustannuksia ja kasvihuonekaasupäästöjä vähentäviä ratkaisuja, kun esimerkiksi vähäiselle käytölle jäävä tila, kuten auditorio, päätetään rakentamisen sijaan tarpeen mukaan vuokrata läheisestä rakennuksesta. (Haahtela, viitattu 10.06.2022).

Varhaisessa vaiheessa mahdollinen vajaakäyttö tunnistetaan siis tilankäytön optimoinnilla, jolla pystytään ohjaamaan samankaltaisia toimintoja yhteisiin tiloihin tai pidentämään tilojen toiminta-aikoja. Tilankäytön optimointi auttaa simulaatiomallin käyttäjää saamaan irti parhaan hyödyn olemassa olevista tiloista tai suunnittelemaan tehokkaita tiloja. (Haahtela, viitattu 13.06.2022).



Kuva 8. Vaikutusmahdollisuudet ja tiedon määrä rakennushankkeen aikana Haahtelan TVD-simulaatiomallin avulla. (Haahtela, viitattu 10.06.2022).

Haahtelan TVD-simulaatiomalliin lisättiin 20.6.2022 rakennuksen hiilijalanjälkilaskenta, joka toistaiseksi kattaa rakentamisvaiheen hiilijalanjäljen, eli moduulin A. Rakennuksen käytön aikaisen hiilijalanjäljen simulointi on kehitteillä, ja se julkaistaan lähitulevaisuudessa. Rakennushankkeen simulaatiomalli soveltuu hanke- ja ehdotussuunnitteluvaiheen hiilijalanjäljen ohjaamiseen mainiosti etenkin rakennusmateriaalien ja työmaan päästöjen osalta.

Rakennushankkeen simulaatiomalli käyttää toistaiseksi rakennustuotteiden hiilijalanjäljen laskemiseen kansallisen päästötietokannan generisiä, konservatiivisia arvoja, jo-

ten tuotemerkkikohtaista vertailua ei sen avulla vielä ole mahdollista tehdä. Rakennuksen simulaatiomalliin on kuitenkin tarkoitus lisätä EPD-dokumentteihin perustuvia tietoja tulevaisuudessa, jolloin tuotemerkkikohtainen hiilijalanjälkitarkastelu helpottuisi. Toistaiseksi EPD-dokumentteihin perustuvaa tuotemerkkien vertailua voidaan tehdä lähinnä One Click LCA -laskentaohjelmalla. EPD-dokumentit sisältävät paljon tietoa, joten käsin laskeminen ei ole tässä tapauksessa mielekäästä.

TVD-simulaatiomalli kattaa toistaiseksi siis elinkaaren vaiheet A1-A5, eli raaka-aineiden hankinnan ja käsittelyn, kuljetuksen valmistukseen, valmistuksen, kuljetukset työmaalle ja työmaatoiminnot. Elinkaaresta tarkastelematta jäävät toistaiseksi siis käytön-aikainen energia ja purkamisen hiilijalanjälki.

7. FIKTIIVINEN TAPAUSTUTKIMUS HIILIJALANJÄLJEN OHJAUksesta RAKENNUSHANKKEEN SIMULAATIOMALLILLA HANKESUUNNITTELUVAIHEESSA

Rakennushankkeen simulaatiomallin hiilijalanjätkilaskentaa testataan tässä kappaleessa kuvitteellisella tapaustutkimuksella. Tapaustutkimuksen kohteesta tehdään kaksi versiota, joista ensimmäisessä pyritään simuloimaan geneerisiä suunnitteluratkaisuja ja yleistä rakentamistapaa. Ensimmäisen tarkastelun tontin perustamissyvyydessä on savimaata. Toisessa versiossa tarkoituksena on nostaa tila- ja materiaalitehokkuutta massoittelun keinoin, jolloin odotettu tulos olisi rakentamisesta aiheutuvan hiilijalanjäljen, nk. hiilipiikin pientyminen verrattuna ensimmäiseen versioon. Toisen tarkastelun maalaji perustamissyvyydessä on moreeni.

Hiilijalanjätkilaskelma ottaa toistaiseksi laskuissa huomioon myös rakentamispaikan vaikutuksen hiilijalanjälkeen, joka ympäristöministeriön vähähiilisyuden arviointimenetelmän mukaan esitettäisiin erillisenä lukuna. Rakennuspaikka on molemmissa versioissa maalajia lukuun ottamatta sama. Piha-alueet toteutetaan molemmissa versioissa samanlaisina. Vertailtavien kohteiden sijainniksi valittiin Espoon Niittykumpu.

Kohteen perustiedot valitaan siten, että toiminnallisuuden kehittämislle on hyvät mahdollisuudet. Edellä mainittu rajaus poistaa vaihtoehtoista asuinrakentamisen, koska asuntotuotannossa liikkumavaraa on verrattain vähän, sillä nykyaikaisista asunnoista on löydyttävä tietyt toiminnallisuudet eikä asuntojen käyttöasteisiin voida vaikuttaa. Eri-tyisen herkkiä käyttöasteille ja toiminnallisuuden parantamiselle ovat muun muassa toimistot, paikoitus sekä hammaslääkäriasemat, joten tarkastellaan tapaustutkimuksena yhdistettyä toimisto- ja hammaslääkäkirakennusta, jonka kellarikerroksessa on autohalli. Autopaikkojen mitoituksessa on käytetty kaavan ohjetta: 1 autopaikka/toimisto- ja liikerakennuksen 70 k-m². Autopaikkoja tarvitaan mitoituksen mukaan 49 kpl.

Tapaustutkimuksen valinnat ovat tyypillisiä tarveselvitys- ja hankesuunnitteluvaiheen ratkaisuja, kuten esimerkiksi hammaslääkäriaseman käyttöajan kasvattaminen kuuteen päivään viikossa. Tapaustutkimus osoittaa, että rakennushankkeen hiilijalanjäljen ohjaukseen täytyy osallistaa, paitsi rakennusala, myös rakennuksen tilaajat.

Simuloinnissa on käytetty runkomateriaalina terästä. Simulaatiomalli mallintaa toistaiseksi kaikkien rakennusten rungot teräksisinä, ja muutos muille runkomateriaaleille

vaatii rungon mitoittamista. Rungon mitoitus muille materiaaleille on mahdollista tulevaisuudessa myös simulaatiomallilla.

7.1 Fiktiivisen kohteen simulointi ilman tilatehokkuusoptimointia

Selite	Aktiivisuus	Määrä	Mitoitin	Apumitoitin
▶ Toimisto	<input checked="" type="checkbox"/>		130,0 työpistettä	50,0 % työhuoneita
▶ Hammashoitoyksikkö	<input checked="" type="checkbox"/>	25 000,0	tutkimusta vuodessa	40,0 aukiolotuntia viikossa
▶ Pysäköintihalli	<input checked="" type="checkbox"/>		53,0 autoa	1,0 ei käytössä

Kuva 9. Fiktiivisen kohteen tilamitoituksen lähtötiedot.

Tarkastelun alussa valitaan hammashoitoyksikölle mitoittimeksi 25000 tutkimusta vuodessa, kellarin paikoitukseen 53 autopaikkaa sekä toimistoon 130 työpistettä. Apumitoittimena hammashoitoyksikölle käytetään viiden päivän aukioloaika viikossa, eli 40 tuntia ja toimistolle työhuoneiden prosenttiosuutta eli 50 %. Vakioarvoinen tilamitoitus olettaa, että hammashoitoyksikkö on auki kahdeksan tuntia päivässä viitenä päivänä viikossa ja toimistossa työhuoneita on 50 % työpisteistä.

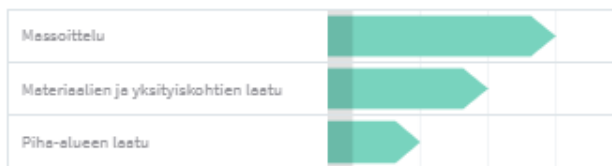
Tilamitoituksen jälkeen simuloidaan rakennukselle tilat. Simulointi luo annettujen parametrien avulla toimintatilojen lisäksi myös muut tilat, eli jakavan liikenteen tilat, kiinteistötoiminnan tilat, talotekniikkatilat sekä osastoivan liikenteen tilat.

Simulaatio luo rakennuksen oletusarvoisesti neljän maanpäällisen kerroksen korkeisena, lisäksi rakennuksessa on autohalli kellarissa sekä ilmanvaihtokonehuone katolla.

Geometria ja pohjaolosuhteet

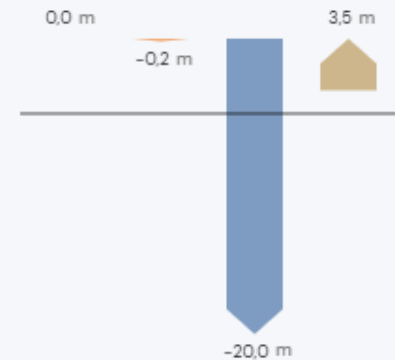


Arkkitehtuuri



Korkeusasema

- Alimman lattian taso
- Rakennettu maanpinta
- Kantavan maapohjan taso
- Pohjavedenpinnan taso
- Alkuperäinen maanpinta



Kuva 10. Rakennuksessa on kellarissa sijaitsevan autohallin lisäksi neljä kerrosta ja katolla ilmanvaihtokonehuone.

Kerrosten nuolissa kärjen valkea osuus kuvaa aukkojen määrää laatussa ja massoitte-
lun nuoli kuvaa rakennuksen monimuotoisuutta, kuten ulokkeiden määrää.

Simulaatiosta saadaan tässä vaiheessa tilaluettelo, rakentamisen hinta sekä rakenta-
misvaiheen hiilijalanjälki (moduulit A1-5).

Tilat	Huoneala	Huoneistoala
	238 kpl	5 022 hum ²
Bruttoala	Neliöpäästö	Kokonaispäästö
	5 731 brm ²	782 kg CO ₂ e/htm ²
		4 030 881 kg CO ₂ e

Kuva 11. Simulaation tulokset ilman tilatehokkuusoptimointia.

Tehdään seuraavaksi laskelma tehostetuilla tiloilla ja helpommin perustettavalla tontilla.

Selite	Aktiivisuus	Määrä	Mitoitin	Apumitoitin
‣ Toimisto	<input checked="" type="checkbox"/>		130,0 työpistettä	20,0 % työhuoneita
‣ Hammashoitoyksikkö	<input checked="" type="checkbox"/>	25 000,0	tutkimusta vuodessa	48,0 aukiolotuntia viikossa
‣ Pysäköintihalli	<input checked="" type="checkbox"/>		50,0 autoa	1,0 ei käytössä

Kuva 12. Fiktiivisen kohteen tilamitoituksen lähtötiedot, tehostettu.

7.2 Fiktiivisen kohteen simulointi optimoidulla tilatehokkuudella

Tarkastelun alussa valitaan hammashoitoyksikölle mitoittimeksi 25000 tutkimusta vuodessa, kellarin paikoitukseen 50 autopaikkaa sekä toimistoon 130 työpistettä. Apumitoittimena hammashoitoyksikölle käytetään kuuden päivän aukioloaika viikossa, eli 48 tuntia ja toimistolle työhuoneiden prosenttiosuutta, eli 20 %. Tehostettu tilamitoitus johti pienentyneeseen huoneistoalaan, jonka vuoksi paikoitustarve pieneni kolmen auton verran. Massoittelua myös yksinkertaistettiin ja rakennuksen kerroslukumäärää pienennettiin yhdellä, jolloin rakennuksen hoikkuus pienenee ja saadaan hiilijalanjäljessä säästöjä vaipan alan pienentymisellä sekä kantavien rakenteiden keventymisellä. Rakennuksen kerrosluvun pienentäminen (huoneistoalaa pienentämättä) voi toisaalta aiheuttaa kasvua maanrakennustöiden ja perustusten määrään, jolloin kerrosluvun pienentäminen ei aina vähennä rakentamisen kasvihuonekaasupäästöjä tai kustannuksia.

Geometria ja pohjaolosuhteet

Maalaji maanpinnalla	Moreeni
Maalaji perustamissyvydessä	Moreeni
Maaston kaltevuus	0 %
Ulkopuolisen lähteen geometriatiedot	<input type="checkbox"/>
5. 4,2 %	
4. 24 %	
3. 24 %	
2. 24 %	
1. 24 %	

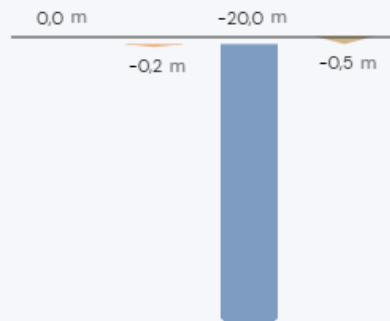
+ LISÄÄ KERROS - POISTA KERROS

Arkkitehtuuri

Massoittelu	
Materiaalien ja yksityiskohtien laatu	
Piha-alueen laatu	

Korkeusasema

- Alimman lattian taso
- Rakennettu maanpinta
- Kantavan maapohjan taso
- Pohjavedenpinnan taso
- Alkuperäinen maanpinta



Kuva 13. Rakennuksessa on kellarissa sijaitsevan autohallin lisäksi kolme kerrosta ja katolla ilmanvaihtokonehuone.

Tilat	Huoneala	Huoneistoala
189 kpl	4 517 hum ²	4 618 htm ²
Bruttoala	Neliöpäästö	Kokonaispäästö
5 042 brm ²	571 kg CO ₂ e/htm ²	2 636 943 kg CO ₂ e

Kuva 14. Simulaation tulokset optimoidulla tilatehokkuudella.

Tässä tapauksessa simuloitu huoneala on 4517 hum², huoneistoala 4618 htm², bruttoala 5042 brm², moduulit A1-5 hiilijalanjälki 2637 tCO₂e ja moduulit A1-5 hiilijalanjälki huoneistoneliölle 571 kgCO₂e.

7.3 Tulosten vertailu

Geneerisillä suunnitteluratkaisuilla ja tehostustoimenpiteillä simuloidut rakentamisvaiheen kasvihuonekaasupäästöt on koottu alle.

Versio	Päästöt kgCO ₂ e	Ero* kgCO ₂ e	Ero** %	hinta €	hinta €/m ²
Geneerinen	4 030 881	0	0	14 527 052	2 818
Tehostettu aukiolo	4 004 452	-26 429	-0,7	14 355 324	2 813
Avokonttorin osuuden lisääminen	3 867 427	-163 454	-4,1	13 774 230	2 752
Paikoituksen vähentyminen	3 999 811	-31 070	-0,8	14 407 638	2 843
Kerrosluvun pienentäminen	4 127 743	+96 862	+2,4	14 581 357	2 829
Massoittelun tehostaminen	3 826 236	-204 645	-5,07	13 957 117	2 706
Maalajin vaihtaminen	3 455 058	-575 823	-14,3	13 744 848	2 666
Tehostettu versio	3 331 854	-717 027	-17,8	13 280 306	2 575

*Rakentamisvaiheen kokonaispäästöjen erotus alkuperäiseen kilogrammoina hiilidioksidiekvivalenttia

**Rakentamisvaiheen kokonaispäästöjen erotus alkuperäiseen prosentteina

Taulukko 1. Ehdotusten simulointitulokset

7.3.1 Hammashoitoyksikön aukioloajan nostaminen

Hammashoitoyksikön aukioloajan merkitystä hiilijalanjälkeen tarkasteltiin yksittäisenä toimenpiteenä. Vuosittaisen tutkimusmäärän pysyessä ennallaan viikoittaisen aukioloajan nostaminen vähentää tilatarvetta ja näin kasvattaa tilatehokkuutta. Tilatarpeen ja henkilömäärän pieneneminen vaikuttaa edelleen paikoitustarpeeseen, mutta paikoitus on jyvitetty omaksi toimenpiteekseen, joten tämän kappaleen päästövähennys syntyy ainoastaan hammashoitoyksikön pienentyneestä tilatarpeesta.

Looginen viikoittainen aukioloaika voisi olla hammashoitoyksikölle 40 tunnin sijasta 48 tuntia, jolloin yksikkö olisi auki 6 päivänä viikossa ja 8 tuntia päivässä. Viikoittaisen aukioloajan nostaminen 48 tuntiin johti 26 429 kgCO₂e päästövähennykseen.

7.3.2 Avokonttoriosuuden kasvattaminen

Toimiston huonejaon merkitystä hiilijalanjälkeen tarkasteltiin yksittäisenä toimenpiteenä. Työhuoneet vievät runsaan mitoituksensa ja väliseinien vuoksi enemmän tilaa verrattuna avokonttoriin, joten avokonttorityöpisteiden tilatarve on pienempi. Paikoitustarve on usein kaavassa määrätty huoneistoalaperusteiseksi, joten paikoituksen rakentamisvelvollisuus pienenee, kun tilatarve pienenee. Henkilömäärän pysyessä samana on kuitenkin hieman kyseenalaista vähentää paikoitusta. Paikoitus on jyvitetty omaksi toimenpiteekseen, joten tämän kappaleen päästövähennys syntyy ainoastaan hammashoitoyksikön pienentyneestä tilatarpeesta.

Alkuperäisessä skenaariossa työhuoneiden osuus työpisteistä on 50 % ja vastaavasti avokonttorin osuus 50 %. Tarkasteltiin tilanne, jossa työhuoneiden osuus on 20 % ja avokonttorin osuus 80 %. Avokonttoriosuuden lisääminen johti 163 454 kgCO₂e päästövähennykseen.

7.3.3 Paikoitustarpeen pienentyminen

Tarkastelussa on käytetty paikoituksen mitoitusetta 1 autopaikka/toimisto- ja liikerrakennuksen 70 k-m². Hammashoitoyksikön aukioloajan nostamisella ja toimiston avokonttoriosuuden kasvattamisella autopaikkoja tarvitaan mitoituksen mukaan 3 kappaletta vähemmän. Tämä tutkimus ei ota kantaa autopaikkojen todelliseen tarpeeseen, vaan ainoastaan mitoitus ehdon täyttymiseen.

Autopaikkojen määrän tippuminen 53:sta 50:een johti 31 070 kgCO₂e päästövähennykseen.

7.3.4 Kerrosluvun pienentäminen yhdellä

Tarkastelussa on rakennuksessa neljä maanpäällistä kerrosta, yksi kellarikerros ja ilmanvaihtokonehuone katolla. Kerrosluvun pienentäminen pienentää samalla rakennuksen vaipan pinta-alaa ja keventää kantavia rakenteita, jolloin rakennuksen massa on kevyempi ja rakennuksen lämpöhäviö pienenee, mutta saattaa toisaalta lisätä maanrakennustöitä ja perustusten määrää. Kantavien rakenteiden keventymisellä voidaan mahdollisesti säästää myös bruttoneliöitä, kun kantavat rakenteet vievät vähemmän tilaa.

Toisaalta kerrosluvun käsittely ei ole lineaarista hiilijalanjäljen ja kustannusten suhteen. Kerrosluvun pinta-alan suhde poistumisreitteihin tms. johtaa epäjatkuvuuksiin, vaikka kerrosluvun kasvattaminen samalla pinta-alatavoitteella johtaa kuitenkin trendinä hiilijalanjäljen ja kustannusten kasvuun.

Kerrosluvun pudottaminen yhdellä johti 96 862 kgCO_{2e} lisäpäästöihin.

7.3.5 Massoittelun tehostaminen

Massoittelun tehostaminen tarkoittaa rakennuksen muodon ja aukotusten yksinkertaistamista. Massoittelun tehostaminen on yleensä kustannustehokasta ja pienentää vaipan alaa, mikä tuo säästöä myös lämmitysenergian käytössä ja huoltamisessa. Rakennushankkeen simulaatiomallilla massoittelua voidaan tehdä Massoittelu-valitsinta liu'uttamalla tai syöttämällä rakennukselle geometria.

Massoittelun tehostaminen liukuvalitsimen kolmella pykälällä johti 204 645 kgCO_{2e} päästövähennykseen.

7.3.6 Perustamissyvyyden maalaji

Tonttivalinnalla ja huolellisilla pohjatutkimuksilla voidaan kartoittaa perustamiskustannusten lisäksi rakennuspaikasta aiheutuva hiilijalanjälki. Savisesta maasta voi aiheutua raskaita perustusratkaisuja sekä maanvaihtoja, jotka aiheuttavat kustannuksia ja päästöjä.

Perustamissyvyyden maalajin vaihtamisella simulaatiomalliin savesta moreeniksi johti 575 823 kgCO_{2e} päästövähennykseen.

7.4 Tilatehokkuusoptimointitoimenpiteiden ja perustamisolosuhteiden vaikutus rakentamisen hiilijalanjälkeen

Tonttivalinnalla, hammashoitolan käyttöasteen nostamisella, toimiston työhuoneiden vähennyksellä, tehokkaalla massoittelulla ja tilasäästöillä saavutetulla paikoitustarpeen pienentymisellä saatiin simuloinnin mukaan 17,8 % eli 717 027 kgCO_{2e} pienentynyt rakentamisvaiheen hiilijalanjälki alkuperäiseen skenaarioon verrattuna. Vastaavien kasvihuonekaasupäästöjen tuottaminen päästökaupan alla maksaisi (hinta 18.2.2022 88,3 €/tCO_{2e}) 63 313,5 €. A-energialuokan dieselautolla (päästöt 99 g/km) vastaavan määrän kasvihuonekaasupäästöjä tuottaisi ajamalla 7 242 697 kilometriä. Tilatehokkuuden parantamisella siis karsittiin ainoastaan turhia, arvoa tuottamattomia tiloja ja muokattiin rakennuksen muotoa energiatehokkaammaksi huonontamatta rakennuksen käytettävyyttä.

Rakennuksen elinkaaren hiilijalanjälki oletettavasti pieneni vielä tätäkin enemmän, sillä lämmitettyä tilaa ja rakennuksen vaipan pinta-alaa saatiin myös vähennettyä. Vaipan pinta-alan ja lämmitetyn tilan vähentäminen näkyy suoraan rakennuksen energiankulutuksen pienenemisenä, mutta toistaiseksi rakennushankkeen simulaatiomalli ei pysty mallintamaan koko elinkaaren hiilijalanjälkeä.

Toimenpiteiden vaikutusta tarkasteltiin myös erillisinä toimenpiteinä. Erillistarkaste- luissa lähtöarvoina käytettiin kappaleessa 7.1 käytettyjä arvoja.

Tontin merkitys rakentamisen hiilijalanjälkeen on esimerkkitapauksessa erittäin merkit- tävä. Pienimmätkin vaikutukset ovat päästökauppahinnoiksi muutettuna tuhansia eu- roja, joten esimerkkitapauksen perusteella kerrosluvun pienentämistä lukuun ottamatta kaikki yksittäiset toimenpiteet pienensivät merkittävästi rakentamisen hiilijalanjälkeä.

Tämän tapaustutkimuksen tulokset vastasivat enimmäkseen odotettua. Kerrosluvun pienentäminen yhdellä kuitenkin nosti rakentamisvaiheen kokonaispäästöjä, joka puo- lestaan johtui perustusten ja palkiston määrän kasvusta. Tulosten perusteella raken- nuksen kerrosluku olisi suotavaa optimoida simuloimalla useampi eri kerrosluku, jotta hiilijalanjälki ja kustannukset olisivat mahdollisimman pienet.

Tämän tapaustutkimuksen vertailtavuutta heikentää runkomateriaalina käytetty teräs ja parkkihallin suuri suhteellinen osuus. Myös rakennuksen elinkaaren muiden vaiheiden päästöjen puuttuminen vaikeuttaa vertailtavuutta.

8. EHDOTUSSUUNNITELMIEN KASVIHUONE- KAASUPÄÄSTÖJEN VERTAILU RAKENNUS- HANKKEEN SIMULAATIOMALLIN AVULLA

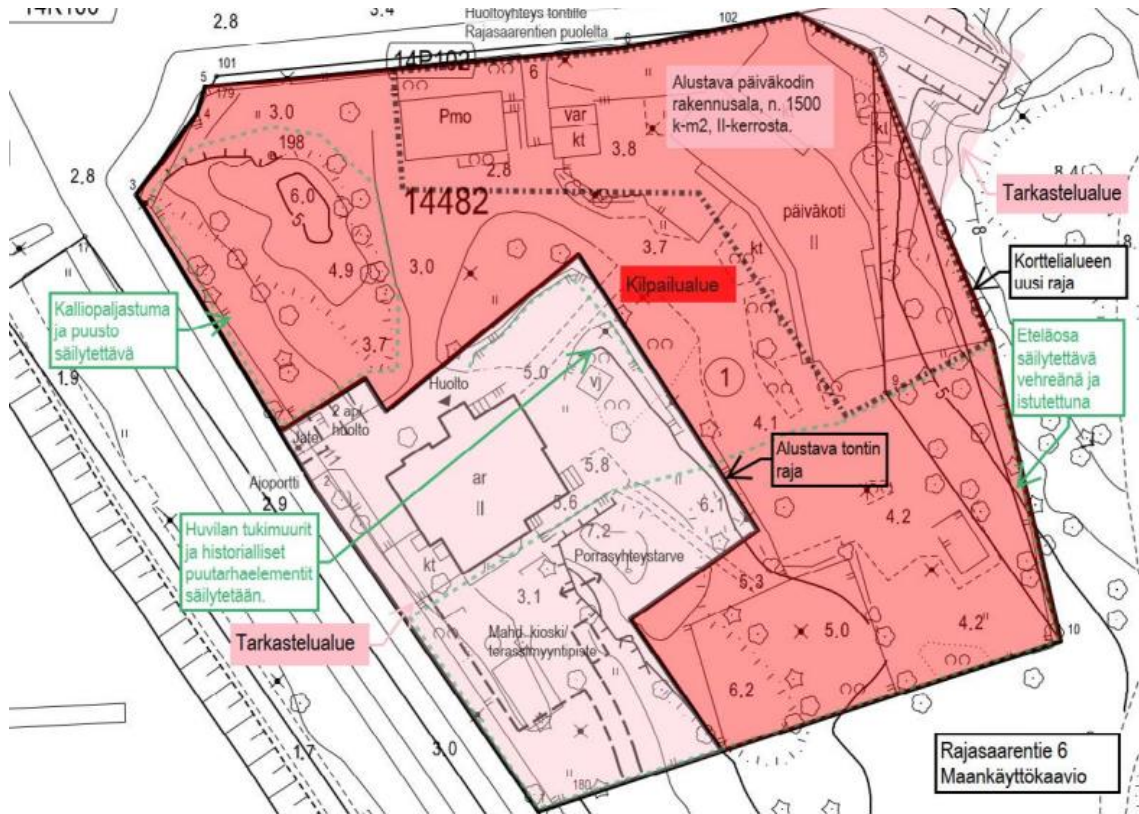
Rakennushankkeen simulaatiomallin hiilijalanjätkilaskentaa testataan tässä kappaleessa simuloimalla Helsingin Taka-Töölöön rakennettavan päiväkodin yleisen arkkitehtikilpailun neljä palkittua kilpailuehdotusta. Simulaatiossa keskitytään massoittelun vaikutuksiin rakentamisvaiheen kasvihuonekaasupäästöissä. Kilpailukutsu ja ehdotukset on saatu Suomen Arkkitehtiliitto SAFA:lta. Ehdotusten planssit on saatu PDF-tiedostoina, joista tarvittavat lähtötiedot on mitattu ja luettu. Kilpailussa ehdotuksista on tehty kaksi versiota, joista tässä työssä käytetään ensimmäistä, sillä ohjausmahdollisuus ensimmäisestä versiosta on suurempi. Toiset versiot ehdotuksista puolestaan olivat keskenään samankaltaisempia.

Simuloinnin tarkoituksena on tarkastella eri ehdotusten, joissa on keskenään vastaavat tilaohjelmat ja sama tontti, rakentamisvaiheen hiilijalanjälkeä. Simuloinnin on siis tarkoitus demonstroida erityisesti massoittelun vaikutusta hiilijalanjälkeen. Simuloinnissa ehdotusten rakenteet yhtenäistetään, jotta pystytään tarkastelemaan ainoastaan massoittelun vaikutusta hiilijalanjälkeen. Rakennuksen runko on mallinnettu teräksisenä, sillä simulaatiomalli pystyy toistaiseksi mitoittamaan rungon ainoastaan teräksisenä. Rakentamisvaiheen hiilijalanjätkilaskelmassa on vielä puutteita, sillä kaikille rakennusosille ja rakennetyypeille ei vielä ole saatavilla päästötietoja.

8.1 Kilpailukohde

Kilpailualueen sijainti on Helsingin Taka-Töölössä, osoitteessa Rajasaarentie 6, 00250 Helsinki. Päiväkoti on tavoiteohjelman mukaisesti noin 1 900 bruttoneliön suuruinen kellariton kaksikerroksinen uudisrakennus, jossa on 180 päiväkotipaikkaa ja henkilökuntaa 30–35 henkeä. Piha on osa oppimisympäristöä, jossa tulee olla mahdollisuus varjoon, istuskeluun ja välipalaruokailuun. Kantavien rakenteiden käyttöikätaavoite on 100 vuotta. Päiväkoti on tarkoitus ottaa käyttöön tammikuussa 2025.

Rakennettavan päiväkodin tontilta puretaan vuonna 1988 valmistunut päiväkotirakennus Piilopirtti ulkorakennuksineen (pumppaamorakennus). Samalla tontilla sijaitsevalle huvilalle muodostetaan tässä yhteydessä oma tonttinsa.



Kuva 15. Kilpailualueen rajaus. (Helsingin kaupunki, 2021)

8.2 Tarkasteluun valitut ehdotukset

Simuloitaviksi kilpailuehdotuksiksi on valittu voittanut ehdotus "Poks" sekä jaetulle 2. sijalle tulleet ehdotukset "JEAN", "LÄTSÄ" sekä "LUOTSI". Helsingin kaupungin palkintolautakunta on yksimielisesti suositellut ehdotuksen "Poks" valitsemista jatko suunnittelun pohjaksi ja suunnittelutehtävän antamista kyseisen ehdotuksen laatijalle.



Kuva 16. Voittajaehdotus "Poks". (Helsingin kaupunki, 2021)



Kuva 17. Jaetun kolmannen sijan ehdotus "JEAN". (Helsingin kaupunki, 2021)



Kuva 18. Jaetun kolmannen sijan ehdotus "LÄTSÄ". (Helsingin kaupunki, 2021).



Kuva 19. Jaetun kolmannen sijan ehdotus "LUOTSI". (Helsingin kaupunki, 2021).

8.3 Simuloinnin lähtötiedot

Rakennushankkeen simulaatiomalli tarvitsee massoitellusta kohteesta lähtötiedoikseen kerrokorkeuden, kerroksen bruttoalan, aukkojen alan, kerroksen bruttopiirin, laatan piirin sekä rakennuksen osien määrän, jolla tarkoitetaan kyseisen kerroksen osien määrää, joista ei ole sisäyhteyttä toisiinsa. Tilamitoitus voidaan tehdä simuloimalla tai syöttämällä simulaatiomalliin valmis tilaohjelma. Tässä tarkastelussa on käytetty simuloitua tilamitoitusta, joka on muokattu vastaamaan ehdotusta huonealaltaan. Tilaohjelmat eivät täysin vastaa ehdotusten tilaohjelmia.

Simuloitavassa kohteessa kaikki ehdotukset on suunniteltu samalle tontille, joten pohjaolosuhteiden merkitys rajoittuu lähinnä ehdotusten muotoeroihin, sillä rakennuksen bruttoala oli ehdotussuunnitelmassa annettu. Rakennusosina käytetään simuloinnin oletusarvoja, jotta materiaalivalinnat eivät vaikuttaisi vertailuun.

Tontin tiedot		
PINTA-ALAT	OMINAISUUDET	
Sijainti		
Rajasaarentie 6		
Helsinki		
Tontti		
Tontin pinta-ala	3 000,0 m ²	
Toimialat & rakennusoikeus		
	Rakennusoikeus	Hinta
Yleiset	2 000,0 kem ²	843 €/kem ²
Teollisuus	0,0 kem ²	228 €/kem ²
Liiketilat	0,0 kem ²	993 €/kem ²
Toimitilat	0,0 kem ²	993 €/kem ²
Asuminen	0,0 kem ²	2597 €/kem ²
	Yht: 2000 kem ²	844 €/kem ²

Kuva 20. Tontin lähtötiedot

Selite	kpl	m ² /kpl	m ²	m ² yhteensä	kg CO ₂ e/m ²	kg CO ₂ e
▼ Päiväkoti				1 338,6	835	1 118 232
▼ Toiminto				1 338,6	835	1 118 232
▼ Lasten tilat	1		1 137,6	1 137,6	811	922 125
Eteinen + ruokailu	6	27,0	162,0	162,0	923	149 550
Lepo- ja leikkihuone	12	30,0	360,0	360,0	779	280 370
Lepo- ja leikkihuone	6	40,0	240,0	240,0	773	185 504
Lepo- ja leikkihuone	6	10,0	60,0	60,0	833	50 006
Märkäeteinen	6	10,0	60,0	60,0	1130	67 801
WC	6	12,0	72,0	72,0	1 008	72 553
Sali + varasto	1	75,0	75,0	75,0	775	58 119
Verstas	1	20,0	20,0	20,0	814	16 276
WC, esteetön	1	5,5	5,5	5,5	1 497	8 232
Monitoimitila + keittiönurkkaus	1	45,0	45,0	45,0	749	33 715
Ei kantavat rakennusosat			38,1	38,1		
▼ Henkilökunnan tilat	1		71,1	71,1	879	62 482
Neuvottelutila	1	10,0	10,0	10,0	867	8 669
Toimistotila	1	30,0	30,0	30,0	763	22 902
Pukuhuone	2	10,0	20,0	20,0	890	17 800
Pesuhuone	2	2,5	5,0	5,0	1 166	5 830
WC	2	2,5	5,0	5,0	1 456	7 281
Ei kantavat rakennusosat			1,1	1,1		
▼ Huoltotilat	1		130,0	130,0	1 028	133 624
Kuumennuskeittiö	1	65,0	65,0	65,0	1 175	76 362
Vaateita	1	12,0	12,0	12,0	808	9 702
Siivouskomero	1	4,0	4,0	4,0	830	3 328
Varastohuone	1	33,0	33,0	33,0	887	29 275
Varastohuone	3	4,0	12,0	12,0	1 247	14 958
Ei kantavat rakennusosat			4,0	4,0		
▼ Yhteistoiminnot				335,5	708	237 564
▼ Talotekniikka				195,8	701	137 203
▼ Ilmanvaihtotilat	1		150,5	150,5	707	106 420
IV-konehuone	1	100,0	100,0	100,0	709	70 878
IV-konehuone	1	50,0	50,0	50,0	711	35 542
Ei kantavat rakennusosat			0,5	0,5		
▼ Talotekniikkatilat	1		45,3	45,3	680	30 783
Tekniikkatila	1	25,0	25,0	25,0	672	16 796
Tekniikkatila	1	10,0	10,0	10,0	699	6 994
Tekniikkatila	1	10,0	10,0	10,0	699	6 994
Ei kantavat rakennusosat			0,3	0,3		
▼ Osastoiva liikenne				139,7	718	100 361
▼ Osastoivat liikennetilat	1		139,7	139,7	718	100 361
Porrashuone	2	16,7	33,4	33,4	786	26 271
Porrashuone	2	13,8	27,6	27,6	815	22 500
Porrassaula	3	17,5	52,6	52,6	596	31 383
Tuulikaappi	3	8,6	25,9	25,9	780	20 208
Ei kantavat rakennusosat			0,1	0,1		
Ulkoseinät				159,4		
Kantavat rakenteet				45,3		

Kuva 21. Kilpailun tilaluettelo syötettynä simulaatiomalliin

8.3.1 Nimimerkki ”Poks”

Ehdotuksen ”Poks” geometrian lähtötiedot olivat seuraavat:

- 2-kerroksinen, lisäksi IV-konehuone katolla
- arkkitehdin ilmoittama bruttoala 1840 m²
- 1. kerroksen kerroskorkeus 3,6 metriä
- 1. kerroksen bruttoala 889,3 m²
- 1. kerroksen aukot 0 m²
- 1. kerroksen bruttopiiri 150,4 metriä
- 1. kerroksen laatan piiri 147,7 metriä
- 1. kerroksen osat 1 kappale
- 2. kerroksen kerroskorkeus 3,6 metriä
- 2. kerroksen bruttoala 851,7 m²
- 2. kerroksen aukot 0 m²
- 2. kerroksen bruttopiiri 151,2 metriä
- 2. kerroksen laatan piiri 148,5 metriä
- 2. kerroksen osat 1 kappale

8.3.2 Nimimerkki ”JEAN”

Ehdotuksen ”JEAN” geometrian lähtötiedot olivat seuraavat:

- 2-kerroksinen, IV-konehuone 2. kerroksessa
- arkkitehdin ilmoittama bruttoala 1829 m²
- 1. kerroksen kerroskorkeus 3,52 metriä
- 1. kerroksen bruttoala 1055,9 m²
- 1. kerroksen aukot 0 m²
- 1. kerroksen bruttopiiri 231,9 m²

- 1. kerroksen laatan piiri 211 metriä
- 1. kerroksen osat 1 kappale
- 2. kerroksen kerroskorkeus 3,52 metriä
- 2. kerroksen bruttoala 1071,4 m²
- 2. kerroksen aukot 40,5 m²
- 2. kerroksen bruttopiiri 248,3 m
- 2. kerroksen laatan piiri 228,8 metriä
- 2. kerroksen osat 1 kappale

8.3.3 Nimimerkki "LÄTSÄ"

Ehdotuksen "LÄTSÄ" geometrian lähtötiedot olivat seuraavat:

- 2-kerroksinen, IV-konehuone 2. kerroksessa
- arkkitehdin ilmoittama bruttoala 1945 m²
- 1. kerroksen kerroskorkeus 3,6 metriä
- 1. kerroksen bruttoala 1027 m²
- 1. kerroksen aukot 0 m²
- 1. kerroksen bruttopiiri 160,2 metriä
- 1. kerroksen laatan piiri 156 metriä
- 1. kerroksen osat 1 kappale
- 2. kerroksen kerroskorkeus 3,6 metriä
- 2. kerroksen bruttoala 974,2 m²
- 2. kerroksen aukot 51,2 m²
- 2. kerroksen bruttopiiri 160,2 metriä
- 2. kerroksen laatan piiri 167,7 metriä
- 2. kerroksen osat 1 kappale

8.3.4 Nimimerkki "LUOTSI"

Ehdotuksen "LUOTSI" geometrian lähtötiedot olivat seuraavat:

- 2-kerroksinen, lisäksi IV-konehuone katolla

- arkkitehdin ilmoittama bruttoala 1720
- 1. kerroksen kerroskorkeus 4 metriä
- 1. kerroksen bruttoala 1250,5 m²
- 1. kerroksen aukot 0 m²
- 1. kerroksen bruttopiiri 172,3 metriä
- 1. kerroksen laatan piiri 170 metriä
- 1. kerroksen osat 1 kappale
- 2. kerroksen kerroskorkeus 3,5 metriä
- 2. kerroksen bruttoala 328,3 m²
- 2. kerroksen aukot 0 m²
- 2. kerroksen bruttopiiri 72,5 metriä
- 2. kerroksen laatan piiri 70,4 metriä
- 2. kerroksen osat 1 kappale

8.4 Tapaustutkimuskohteen ehdotusten simulointi

8.4.1 Nimimerkki ”Poks”

Syötettiin kappaleessa 8.3.1 mainitut lähtötiedot simulaatiomallille ja simuloitiin rakentamisvaiheen hiilijalanjälki.

Geometria ja pohjaolosuhteet

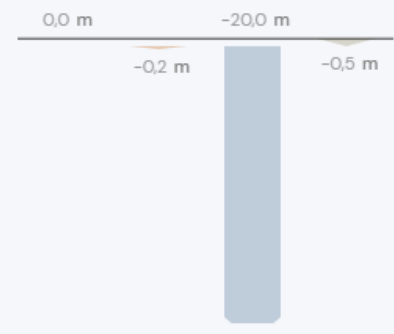
Maalaji maanpinnalla	Moreeni
Maalaji perustamissyvytydessä	Siltti
Maaston kaltevuus	0 %
Ulkopuolisen lähteen geometriatiedot	<input checked="" type="checkbox"/>
3. 166,1 m ²	
2. 851,7 m ²	
1. 889,3 m ²	

Arkitehtuuri

Massoittelu	
Materiaalien ja yksityiskohtien laatu	
Piha-alueen laatu	

Korkeusasema

- Alimman lattian taso
- Rakennettu maanpinta
- Kantavan maapohjan taso
- Pohjavedenpinnan taso
- Alkuperäinen maanpinta



Kuva 22. Simulaation lähtötiedot nimimerkille "Poks"

Neliöpäästö	Kokonaispäästö
786 kg CO ₂ e/htm ²	1 355 796 kg CO ₂ e

Kuva 23. Simulaation tulokset nimimerkille "Poks"

8.4.2 Nimimerkki "JEAN"

Syötettiin kappaleessa 8.3.2 mainitut lähtötiedot simulaatiomallille ja simuloitiin rakentamisvaiheen hiilijalanjälki.

Geometria ja pohjaolosuhteet

Maalaji maanpinnalla	Moreeni
Maalaji perustamissyvytydessä	Siltti
Maaston kaltevuus	0 %
Ulkopuolisen lähteen geometriatiedot	<input checked="" type="checkbox"/>
2. 1 071,4 m ²	
1. 1 055,9 m ²	

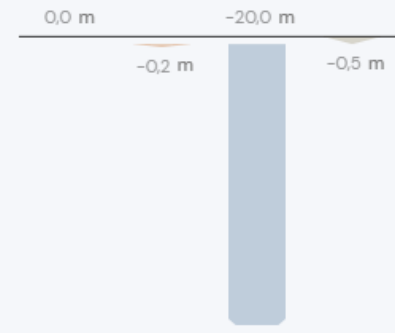
LISÄÄ KERROS POISTA KERROS

Arkitehtuuri

Massoittelu	
Materiaalien ja yksityiskohtien laatu	
Piha-alueen laatu	

Korkeusasema

- Alimman lattian taso
- Rakennettu maanpinta
- Kantavan maapohjan taso
- Pohjavedenpinnan taso
- Alkuperäinen maanpinta



Kuva 24. Simulaation lähtötiedot nimimerkille "JEAN"

Neliöpäästö	Kokonaispäästö
836 kg CO₂e/htm²	1 565 925 kg CO₂e

Kuva 25. Simulaation tulokset nimimerkille "JEAN"

8.4.3 Nimimerkki "LÄTSÄ"

Syötettiin kappaleessa 8.3.3 mainitut lähtötiedot simulaatiomallille ja simuloitiin rakentamisvaiheen hiilijalanjälki.

Geometria ja pohjaolosuhteet

Maalaji maanpinnalla	Moreeni
Maalaji perustamissyvydessä	Siltti
Maaston kaltevuus	0 %
Ulkopuolisen lähteen geometriatiedot	<input checked="" type="checkbox"/>
2. 974,2 m ²	
1. 1 027 m ²	

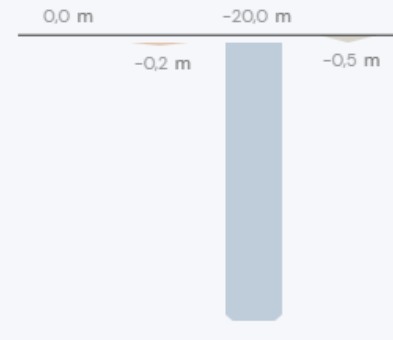
LISÄÄ KERROS POISTA KERROS

Arkkitehtuuri

Massoittelu	
Materiaalien ja yksityiskohtien laatu	
Piha-alueen laatu	

Korkeusasema

- Alimman lattian taso
- Rakennettu maanpinta
- Kantavan maapohjan taso
- Pohjavedenpinnan taso
- Alkuperäinen maanpinta



Kuva 26. Simulaation lähtötiedot nimimerkille "LÄTSÄ"

Neliöpäästö	Kokonaispäästö
752 kg CO ₂ e/htm ²	1 367 737 kg CO ₂ e

Kuva 27. Simulaation tulokset nimimerkille "LÄTSÄ"

8.4.4 Nimimerkki "LUOTSI"

Syötettiin kappaleessa 8.3.4 mainitut lähtötiedot simulaatiomallille ja simuloitiin rakentamisvaiheen hiilijalanjälki.

Geometria ja pohjaolosuhteet

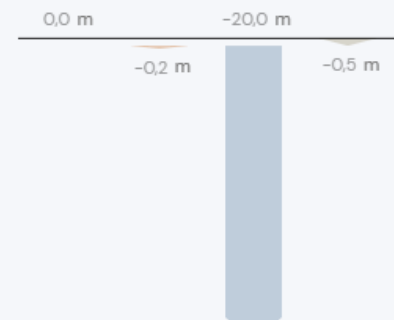
Maalaji maanpinnalla	Moreeni
Maalaji perustamissyvydessä	Siltti
Maaston kaltevuus	0 %
Ulkopuolisen lähteen geometriatiedot	<input checked="" type="checkbox"/>
3. 166,4 m ²	
2. 328,3 m ²	
1. 1 250,5 m ²	

Arkkitehtuuri

Massoittelu	
Materiaalien ja yksityiskohtien laatu	
Piha-alueen laatu	

Korkeusasema

- Alimman lattian taso
- Rakennettu maanpinta
- Kantavan maapohjan taso
- Pohjavedenpinnan taso
- Alkuperäinen maanpinta



Kuva 28. Simulaation lähtötiedot nimimerkille "LUOTSI"

Neliöpäästö	Kokonaispäästö
835 kg CO₂e/htm²	1 333 984 kg CO₂e

Kuva 29. Simulaation tulokset nimimerkille "LUOTSI"

8.5 Tulosten vertailu

Ehdotusten mukaisella geometrialla simuloidut rakentamisvaiheen kasvihuonekaasupäästöt on koottu alle. Simulointituloksissa käytetyt tilaohjelmat eivät täysin vastaa ehdotusten tilaohjelmia, vaan tilaohjelma on kilpailun liitteenä annettu tilaohjelma.

Nimimerkki	Poks	JEAN	LÄTSÄ	LUOTSI
Bruttoala, ilmoitettu m ²	1840	1829	1945	1720
Bruttoala, simuloitu m ²	1929	2127	2001	1767
Hyötyala, ilmoitettu m ²	1440	1320	1295	1430
Hyötyala, simuloitu m ²	1439	1320	1295	1431
Rakentamisvaiheen päästöt, kgCO ₂ e	1 355 796	1 565 925	1 367 737	1 333 984
Rakentamisvaiheen neliöpäästöt, kgCO ₂ e/simuloitu htm ²	942	1186	1056	932
Kokonaispäästöjen ero pienimpään, kg	+21 812	+231 941	+33 753	0
Kokonaispäästöjen ero pienimpään, %	+1,6	+17,4	+2,5	0
Neliöpäästöjen (kgCO ₂ e/htm ²) ero pienimpään, %	+1,0	+27,3	13,0	0
Kokonaishinta, €	5 948 951	6 533 055	5 980 662	5 803 733
Neliöhinta, €/simuloitu brm ²	3 450	3 488	3 289	3 674

Taulukko 2. Ehdotusten simulointitulokset

Tuloksissa pienimmät rakentamisvaiheen kasvihuonekaasujen kokonaispäästöt olivat ehdotuksessa "LUOTSI" ja suurimmat ehdotuksessa "JEAN". Ehdotuksen "JEAN" kasvihuonekaasujen kokonaispäästöt olivat 17,4 % suuremmat kuin ehdotuksen "LUOTSI". Suurimpien ja pienimpien kokonaispäästöjen erotus oli 231 941 kgCO_{2e}. Vastaavien kasvihuonekaasupäästöjen tuottaminen päästökaupan alla maksaisi (hinta 18.2.2022 88,3 €/tCO_{2e}) 20 480,4 €. A-energialuokan dieselautolla (päästöt 99 g/km) vastaavan määrän kasvihuonekaasupäästöjä tuottaisi ajamalla 2 342 838 kilometriä.

Tuloksissa pienimmät rakentamisvaiheen kasvihuonekaasujen neliöpäästöt olivat ehdotuksessa "LUOTSI" ja suurimmat ehdotuksessa "JEAN". Ehdotuksen "JEAN" kasvihuonekaasujen neliöpäästö oli 27,3 % suurempi kuin ehdotuksen "LÄTSÄ".

Kaikki simuloidut ehdotukset on laadittu arkkitehtuurikilpailuun samoilla kriteereillä, joten tuloksissa korostuu massoittelemisen vaikutus rakentamisen kasvihuonekaasupäästöihin.

Tämän tapaustutkimuksen tulokset vastasivat odotuksia. Tämän tapaustutkimuksen vertailtavuutta heikentäviä asioita olivat runkomateriaalina käytetty teräs, simulaatiomallilla simuloitu geometria ja ehdotusten toisistaan poikkeavat tilaohjelmat. Myös rakennuksen elinkaaren muiden vaiheiden päästöjen puuttuminen vaikeuttaa vertailtavuutta.

Tutkimuksessaan Acquaye ja Duff esittävät, että paremmalla suunnittelulla voitaisiin vähentää rakentamisen kasvihuonekaasupäästöjä jopa 20 %. (Acquaye, Duff, 2010). Tämän tutkimuksen tulokset ovat Acquayen ja Duffin tutkimuksen kanssa linjassa.

9. TOIMENPIDE-EHDOTUKSIA

Tässä kappaleessa esitetään ehdotuksia projektinjohtoyhtiön toiminnan kehittämiseksi ympäristövastuullisemmaksi. Toimenpiteet on jaettu hanke- ja ehdotussuunnitteluvaiheen kehitysehdotuksiin.

9.1 Hiilijalanjäljen ohjaaminen hankesuunnitteluvaiheessa

Hankesuunnitteluvaihe on hiilijalanjäljen määräytymisen kannalta merkittävä vaihe, sillä suurimmat päätökset päästöjä koskien tehdään juuri hankesuunnitteluvaiheessa.

Hankesuunnitteluvaiheessa tehtäviä hiilijalanjäljen ohjaustoimenpiteitä voisivat olla

- simulaatiomallin luominen päätösten tueksi ja vertailemiseksi
- vähähiilisyteen käytettävän rahamäärän määrittäminen
- hiilibudjetin määrittäminen
- päätös tavoiteltavasta energialuokasta
- sisäisen tai ulkoisen elinkaariasiantuntijan kiinnittäminen hankkeeseen
- päätös haettavasta ympäristöluokituksesta ja sen tasosta
- päätös rakennuksen suunnitellusta käyttöiästä
- rakennusaikaisen lämmitysjärjestelmien vertailu
- lajittelu- ja kierrätysastetavoitteen asettaminen
- päätös vaatia EPD-dokumentit merkittävimmistä materiaaleista
- päätös sitouttaa ja motivoida suunnittelijat ja urakoitsijat hiilijalanjälkitavoitteisiin tarjoamalla rahallinen kannustin tavoitteisiin päästäessä
- päätös pienentää työmaan päästöjä vaihtoehtoisilla energiamuodoilla lämmityksessä ja työkoneissa
- selvitys mahdollisuuksista tuottaa tontilla uusiutuvaa energiaa

9.2 Hiilijalanjäljen ohjaaminen ehdotussuunnitteluvaiheessa

Ehdotussuunnitteluvaiheessa rakennuksen muoto ja koko tarkentuu, jolloin mahdollisuuksia vaikuttaa rakennuksen elinkaaren hiilijalanjälkeen on vielä runsaasti.

Yleissuunnitteluvaiheessa tehtäviä hiilijalanjäljen ohjaustoimenpiteitä voisivat olla

- hiilijalanjätkilaskelman tarkentaminen ja potentiaalisten päästövähennysten tunnistaminen simulaatiomallin avulla
- vähäisen käyttöasteen tilojen minimointi
- arvoa tuottamattomien tilojen, kuten käytävien, minimointi
- runkovaihtoehtojen vertailu
- määriltään suurimpien ja päästöintensivisimpien materiaalien vertailu
- ei-kantavien betonirakenteiden vertailu puurakenteisiin
- käytönaikaisten lämmitysjärjestelmien vertailu
- massoittelu, pyrkimys energiatehokkaaseen ja toimivaan rakennukseen

10. JATKOTUTKIMUS

Rakennushankkeen simulaatiomalli osoittautui erinomaiseksi työkaluksi arvioida rakennushankkeen alkuvaiheen isojen päätösten vaikutusta rakentamisen hiilijalanjälkeen. Simulaatiomallin ensimmäinen versio on julkaistu kesäkuussa 2022, ja seuraavissa päivityksissä Haahtelan on tarkoitus lisätä simulaatiomalliin rakennuksen koko elinkaaren hiilijalanjäljen arviointi ja myöhemmissä vaiheissa rakennusosakohtainen hiilijalanjälkilaskenta sekä tuotemerkkikohtaiset hiilijalanjäljet saatavissa oleville rakennustuotteille perustuen tuotteiden ympäristöselosteisiin eli EPD-dokumentteihin.

Jatkotutkimuksena voisi tutkia Rakennushankkeen simulaatiomallilla rakennuksen elinkaaren aikaista hiilijalanjälkeä sitten, kun se on mahdollista. Tutkimuksen kannalta paras vertailu olisi oikea kohde, josta on tehty hiilijalanjälkilaskelmia esimerkiksi One Click LCA -ohjelmistolla useassa eri vaiheessa. Jatkotutkimuksessa voitaisiin vertailla One Click LCA:lla laskettua hiilijalanjälkeä ja rakennushankkeen simulaatiomallilla simulointua hiilijalanjälkeä keskenään ja etsiä korrelaatioita ja poikkeamia tuloksista sekä analysoida poikkeamien syitä. Rakennushankkeen simulaatiomalliin voidaan tuoda rakennuksen geometria ulkopuolisista malleista, joten simulointi ei jää ainoastaan ohjelman simuloiman muodon varaan, vaan rakennus saadaan simuloitua sellaisena kuin se on suunniteltu.

Toisena jatkotutkimusaiheena pidän suunnittelu- ja hankintavaiheessa tehtävää materiaalivalintojen vaikutuksen arviointia rakennuksen elinkaaren hiilijalanjälkeen. Kun TVD-simulaatiomallilla on mahdollista vertailla rakennustuotteista eri tuotemerkkejä, voidaan vertailua käyttää suunnittelijoiden ja hankinnan apuvälineenä suunnittelussa ja hankinnassa. Menettely säästäisi suunnittelukustannuksia, kun rakennustuotteen valinnan vaikutukset rakennuksen elinkaaren hiilijalanjälkeen olisivat helposti saatavilla ja kokeiltavissa simulaation kautta.

Fiktiivisen vertailun tulosten perusteella rakentamispaiikkojen vertailu päästöjen ja kustannusten osalta olisi myös otollinen tutkimusaihe. Tutkimusongelmaksi voi muodostua arviointimenetelmä, joka ei ota kantaa rakentamispaiikan aiheuttamiin päästöihin, jolloin motivaatio kiinnittää rakentamispaiikkaan huomiota vähenee.

Arkkitehtuurikilpailun ehdotusten vertailun perusteella jatkotutkimusaihe voisi olla selvittää hiilijalanjälkisimuloinnilla arkkitehtuurikilpailuiden ehdotusten bruttoalan vaikutus rakentamisvaiheen kasvihuonekaasupäästöihin tai rakennuksen elinkaaren hiilijalanjälkeen.

11. YHTEENVETO

Rakennusten aiheuttaman hiilijalanjäljen pienentämisessä on runsaasti työtä kestävässä tasossa tavoiteltaessa. Suomen kasvihuonekaasupäästöt ovat asukasta kohti noin kymmenkertaiset kestävässä tasoon verrattuna. Rakennusten aiheuttamat kasvihuonekaasupäästöt taas ovat noin 30 prosenttia koko Suomen kasvihuonekaasupäästöistä, mikä tarkoittaa, että Suomen kestävä kasvihuonekaasupäästöjen taso ylittyy huomattavasti jo ainoastaan rakennusten päästöistä.

Energiantuotannon päästöt ovat kuitenkin laskeneet ja tulevat laskemaan tulevina vuosikymmeninä verrattain nopeasti, joten on aika suunnata katseita myös muihin toimenpiteisiin, kuten rakentamisen hiilipiikin ja turhan tilan rakentamisen vähentämiseen energiatehokkuuden parantamisen lisäksi, sillä käytönaikaisen energiankulutuksen päästöjen vähentäminen ei enää riitä Suomen ja EU:n tavoitteisiin pääsemiseksi. Energiatehokkuus uudis- ja korjausrakentamisessa on kuitenkin edelleen tärkeää, mutta energiantuotantolaitosten päästövähennyksiin emme juurikaan pysty suoraan omilla toimenpiteillämme vaikuttamaan.

Rakentamisessa ympäristötietoisuudessa on vielä runsaasti kehitettävää, joten mielestäni rakennushankkeiden hiilijalanjäljen pienentämisessä tulisi keskittyä isoihin linjoihin, kuten turhan rakentamisen vähentämiseen, tilatehokkuuteen ja vähähiilisiin ratkaisuihin, sillä niiden avulla hiilijalanjälkeä pienennetään tehokkaimmin. Tapauksissa Rakennushankkeen simulaatiomallia hyödyntämällä pystyttiin ohjaamaan rakennuksista tehokkaampia ja rakentamisen hiilipiikki pieneni huomattavasti. Kun rakennus on jo lähtökohtaisesti hyvin massoiteltu ja tilatehokas, on myös rakennusosien, työmaatoimintojen, kuljetusten ja muiden päästölähteiden pienentäminen mielekäästä ja tehokasta.

Rakennuksen hiilijalanjälkeen pystytään vaikuttamaan myös suunnittelun, hankintojen ja rakentamisen ohjaamisella. Kappaleessa 9 on käsitelty toimenpide-ehdotuksia hiilijalanjäljen ohjaamiseksi rakennushankkeen eri vaiheissa. Merkittäviä ohjaustoimenpiteitä ovat esimerkiksi päätökset EPD-dokumenttien vaatimisesta, tavoiteltavasta energialuokasta ja ympäristöluokituksesta, vähähiilisyteen käytettävän rahamäärän budjetointi sekä käytettävien energiamuotojen ja rakennusosien energiatehokkuuden vertailut.

Tapauksissa saatujen tulosten perusteella hankesuunnitteluvaiheessa tehtyjen päästövähennystoimenpiteiden avulla onnistuttiin pienentämään rakentamisvaiheen

kasvihuonekaasupäästöjä 717 027 kgCO₂e eli 17,8 %. Päästövähennykset saatiin aikaan rakennuksen toiminnallisuudesta tinkimättä. Ehdotussuunnitteluvaiheen tapaus- tutkimuksessa saatujen tulosten perusteella samat toiminnot sisällään pitävien ehdotusten suuripäästöisin ehdotus tuotti rakentamisvaiheen kasvihuonekaasupäästöjä pienipäästöisimpään verrattuna 231 941 kgCO₂e eli 27,3 % enemmän.

LÄHTEET

- [1] A. Acquaye, A. Duffy, Input-output analysis of Irish construction sector greenhouse gas emissions, Dublin Institute of Technology, 2009. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.08.022>
- [2] A. Nugent, C. Montano-Owen, L. Pallares, S. Richardson, M. Rowland, EU Policy - Whole life carbon roadmap, The World Green Building Council, 2022. Saatavissa: <https://figbc.fi/julkaisu/eu-policy-whole-life-carbon-roadmap/>
- [3] A. Pennanen, G. Ballard, Y. Haahtela, Designing to targets in a target costing process, Tampereen teknillinen yliopisto, 2011.
- [4] A. Ruuska, T. Häkkinen, Material Efficiency of Building construction, VTT Technical Research Centre of Finland, 2014. Saatavissa: <https://doi.org/10.3390/buildings4030266>
- [5] A. Ruuska, T. Häkkinen, The significance of various factors for GHG emissions of buildings, VTT Research Centre of Finland, 2014. Saatavissa: <https://doi.org/10.1080/19397038.2014.934931>
- [6] Betoniteollisuus Ry, Sementti ja kasvihuonepäästöt. Saatavissa (luettu 27.06.2022): <https://betoni.com/tietoa-betonista/perustietopaketti/betoni-rakennusmateriaalina/sementti-seosaineiden-kaytto/>
- [7] C. De Wolf, F. Pomponi, A. Moncaster, Measuring embodied carbon dioxide equivalent of buildings: A review and critique of current industry practice, University of Cambridge, 2017. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.01.075>
- [8] Denos Living LLC, The WELL Building Standard v1, Denos Living LLC, 2016.
- [9] Euroopan komissio, FAQ: What is the EU Taxonomy and how will it work in practice?, Euroopan komissio, 2021. Saatavissa: https://ec.europa.eu/info/files/sustainable-finance-taxonomy-faq_en
- [10] Eurooppa-neuvosto, Ilmastonmuutos: mitä EU tekee? Päivitetty 26.04.2022. Saatavissa (viitattu 28.6.2022): <https://www.consilium.europa.eu/fi/policies/climate-change/>
- [11] F. Pomponi, A. Moncaster, Embodied carbon mitigation and reduction in the built environment – What does the evidence say? University of Cambridge, 2016. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.08.036>
- [12] Green Building Council Finland, Rakennushankkeiden ympäristöluokitukset Suomessa, Green Building Council Finland, 2018. Saatavissa: <https://figbc.fi/ymparistoluokitukset/>
- [13] Green Building Council Finland, Vähähiilisyyden sanakirja – vähähiilisen rakentamisen ja kiinteistöliiketoiminnan terminologia, Green Building Council Finland, 2020. Saatavissa: <https://figbc.fi/julkaisu/vahahiilisyyden-sanakirja/>

- [14] Haahtela, Hankekehitys. Saatavissa (luettu 13.6.2022): <https://haahtelatvd.com/hankekehitys/>
- [15] Haahtela, TVD-simulaatiomalli – kuinka se toimii. Saatavissa (luettu 10.6.2022): <https://haahtelatvd.com/kuinka-se-toimii/>
- [16] Helsingin kaupungin Palkintolautakunta, Päiväkoti Taka-Töölössä – arvostelupöytäkirja, Helsingin kaupunki, 2021. Saatavissa: <https://www.safa.fi/kilpailu/toolon-paivakoti/>
- [17] ISON tekninen komitea ISO/TMBG, SFS-EN ISO 26000:2020 Yhteiskuntavastuuopas, Suomen standardoimisliitto SFS, 2020. Saatavissa: <https://sales.sfs.fi/fi/index/tuotteet/SFS/CENISO/ID2/2/943796.html.stx>
- [18] J. Kemppainen, Ympäristövaikutukset tulevat rakentamiseen, RT Rakennusteollisuus, 2020. Saatavissa <https://www.rakennusteollisuus.fi/globalassets/talonpiirit/lo-su/ymparistovaatimukset-tulevat-rakentamiseen-turku-2002.pdf>
- [19] T. Raivio, A. Laine, M. Klimscheffskij, A. Heino, J. Lehtomäki, Vähähiilinen rakennusteollisuus 2035 Osa 4. Rakennusteollisuuden ja rakennetun ympäristön vähähiilisyden tiekartta 2020 – 2035 – 2050 Lopullinen versio, Gaia Consulting Oy, 2020. Saatavissa: https://www.rakennusteollisuus.fi/globalassets/ymparisto-ja-energia/vahahiilisyys_uudet/rt_4.-raportti_vahahiilisyden-tiekartta_lopullinen-versio_clean.pdf
- [20] K. Lipponen, T. Mäkelä, Vastuullisuuden suunnannäyttäjät, Elinkeinoelämän keskusliitto EK, 2019. Saatavissa: https://ek.fi/wp-content/uploads/EK_Vastuullisuusjulkaisu_final_net_11.9.2019.pdf
- [21] K. Tiilikainen, P. Kalliomäki, Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen energiatehokkuudesta, Ympäristöministeriö, 2017. Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2017/20171010>
- [22] L. Törnroos, Kestävän kehityksen ja yhteiskuntavastuun standardit ja normit, Tekniikan Akateemisten Liitto TEK ry, 2011. Saatavissa: <https://www.finna.fi/Record/fikka.4148750>
- [23] M. Adams, V. Burrows, S. Richardson, Bringing embodied carbon upfront, The World Green Building Council, 2022. Saatavissa: <https://www.worldgbc.org/news-media/bringing-embodied-carbon-upfront>
- [24] M. F. Ashby, Materials and the Environment, Elsevier Inc., 2013. Saatavissa: <https://www.elsevier.com/books/materials-and-the-environment/ashby/978-0-12-385971-6>
- [25] Motiva Oy, Päästöttömät työmaat – kestävien hankintojen green deal -sopimukset, Motiva Oy. Saatavilla: (luettu 29.4.2022): <https://sitoumus2050.fi/paastontyomaa#/>
- [26] M. Tiuri, Tie kestävään tulevaisuuteen, Tampere University Press, 2011. Saatavissa: <https://www.finlandiakirja.fi/fi/martti-tiuri-tie-kestavaan-tulevaisuuteen-813631.html>
- [27] M. Tähtinen, L. Tähtinen, Hiilineutraalin rakennetun ympäristön toimintaohjelma, Green Building Council Finland, 2021. Saatavissa: <https://figbc.fi/julkaisu/hiilineutraalin-rakennetun-ympariston-toimintaohjelma/>

- [28] M. Tähtinen, L. Tähtinen, Katsaus kiinteistö- ja rakennusalan ilmastokestävyyden nykytilaan, Green Building Council Finland, 2021. Saatavissa <https://figbc.fi/wp-content/uploads/sites/4/2021/04/Katsaus-kira-ilmastokestavyden-nykytilaan-04-2021.pdf>
- [29] M. Wallhagen, M. Glaumann, T. Malmqvist, Basic Building life cycle calculations to decrease contribution to climate change – Case study on an office building in Sweden, University of Gävle, Royal Institute of Technology, 2011. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.02.003>
- [30] R. Ahola, K. Liljeström, Rakennuksen elinkaaren hiilijalanjäljen pienentäminen kustannustehokkaasti vuokratilakohteessa, Asumisen rahoitus- ja kehittämisskeskus, 2018. Saatavissa: <https://figbc.fi/julkaisu/rakennuksen-elinkaaren-hiilijalanjäljen-pienentaminen-kustannustehokkaasti-vuokratilakohteessa/>
- [31] R. Giordano, F. Gallina, B. Quaglio, Analysis and Assessment of the Building Life Cycle. Indicators and Tools for the Early Design Stage, Politecnico di Torino, 2021. Saatavissa: <https://doi.org/10.3390/su13116467>
- [32] Raksystems, Ympäristöselvitykset olemassa oleville rakennuksille, 2020, saatavissa (luettu 25.5.2022): <https://raksystems.fi/kunnat-ja-kiinteistokehittajat/ymparistosertifioinnit-olemassa-oleville-kiinteistoille/>
- [33] Rudus Oy, Rudus Vihreä betoni. Saatavilla (luettu 27.6.2022): <https://www.rudus.fi/tuotteet/betoni/vihrea-betoni>
- [34] S. Marin, Osallistava ja osaava Suomi – Sanna Marinin hallituksen ohjelma 10.12.2019, Valtioneuvosto, 2019. Saatavissa: <https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/handle/10024/161931>
- [35] Suomen ympäristökeskus SYKE, Rakentamisen päästötietokanta, 2021 (päivitetty 2022). Saatavissa: https://www.hiilineutraalisuomi.fi/fi-FI/Tyokalut/Rakentamisen_paastotietokanta
- [36] T. Lahtinen, Rakennuksen vähähiilisuuden arviointimenetelmä, Ympäristöministeriö, 2019. Saatavissa: <https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/handle/10024/161761>
- [37] Ympäristöhallinto, Ympäristöjärjestelmät ja johtaminen, 2013 (päivitetty 2019). Saatavissa (viitattu 7.2.2022): <https://www.ymparisto.fi/emas>
- [38] Ympäristöministeriö, Euroopan unionin ilmastopolitiikka, luettu 28.6.2022. Saatavissa: <https://ym.fi/euroopan-unionin-ilmastopolitiikka>
- [39] Ympäristöministeriö, Rakennuksen ilmastonselvityksen asetuseräluonnos lausunnoille, 2021. Saatavissa (viitattu 28.6.2022): <https://ym.fi/-/rakennusten-ilmastonselvityksen-asetuseräluonnos-lausunnoille-tavoitteena-yhdenmukainen-ja-luotettava-vahahiilisuuden-arviointi>
- [40] Ympäristöministeriö, Rakennuksen vähähiilisuuden arviointimenetelmä 2021 - luonnos lausuntokierrosta varten, Ympäristöministeriö, 2021. Saatavissa: <https://www.lausuntopalvelu.fi/FI/Proposal/Participation?proposalId=0b297461-cdee-4657-9a4e-d2791315257d>