

Suvi Kytölä

RAKENNUSMATERIAALIEN HIILIJALANJÄLJEN LASKENTA

Hiilijalanjäljen laskentaan vaikuttavat tekijät

Kandidaatintyö
Rakennetun ympäristön tiedekunta
Jukka Lahdensivu
Kesäkuu 2023

TIIVISTELMÄ

Suvi Kytölä: Rakennusmateriaalien hiilijalanjäljen laskenta
Calculation of carbon footprint for building materials

Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Rakennetun ympäristön tiedekunta
Kesäkuu 2023

Hiilijalanjäljenlaskenta on koko ajan yleisempää ja merkityksellisempää. Hiilijalanjäljenlaskennan avulla voidaan saavuttaa ympäristötavoitteita, ja todistaa niiden olevan mahdollisia. Tässä tutkimuksessa selvitetään hiilijalanjäljen laskentaa, sekä tutkitaan eri rakennusmateriaalien vaikutusta rakennuksen hiilijalanjälkeen. Tutkimuksessa selvitetään, kuinka paljon rungon materiaali määrittää hiilijalanjälkeä ja kuinka paljon hiilijalanjälkeen voidaan vaikuttaa yksittäisillä materiaalinvalinnoilla. Tutkimuksessa selvitetään myös yksittäisen rakenneosan tasolla, miten paljon yksittäisen rakenneosan muutos vaikuttaa kokonashiilijalanjälkeen. Tutkimuksessa on käytetty rakenneosana yläpohjaa. Laskentaa tehdään tavanomaisilla rakennusmateriaaleilla, tällä hetkellä tarjolla olevilla vähähiilisillä materiaaleilla, sekä rakennusmateriaalien keskiarvotiedoilla. Työn tavoite on saada selville, kuinka paljon eri rakennusmateriaaleilla voidaan vaikuttaa hiilijalanjälkeen.

Työn alussa hiilijalanjäljen laskentaa selvitetään standardin SFS-EN 15804: 2012 ja Ympäristöministeriön (2019) julkaiseman Rakennuksen vähähiilisyysarviointimenetelmä -raportin mukaan. Työssä esitellään rakennuksen elinkaaren kaikki vaiheet eli moduulit. Moduulit ovat osa elinkaariarviointi menetelmää, jonka kautta rakennuksen hiilijalanjälkeä voidaan arvioida. Tässä tutkimuksessa huomioidaan vain A1-3 ja A4, sekä C moduulit.

Tutkimuksen menetelmänä on elinkaariarviointi, joka toteutetaan Excel-ohjelmalla. Laskenta perustuu materiaalien määrätietoihin ja päästötietoihin, eli GWP-arvoihin. Tutkimuksen rakennuksena on halli, joka toteutetaan puu-, terä ja betonirunkoisena. Hallin laskennassa on huomioitu, sen sisällä mahdollisesti oleva siltanosturin tukirunko. Tutkimusta varten on saatu hallien rakenteiden määrätiedot, jokaiselle runkotapaukselle. Materiaalien päästötiedot saadaan tuotevalmistajilta, Rakennussäätiön Rakennustiedon -sivuilta, sekä keskiarvotiedot Suomen ympäristökeskuksen Rakentamisen päästötietokannasta.

Tutkimuksen mukaan yleisesti käytetyillä, tällä hetkellä tavanomaisilla rakennusmateriaaleilla, vähähiilisin runkoratkaisu on betonirunkoinen halli puisella kattoelementtiyläpohjalla. Betonirunkoisin hallin hiilijalanjälki pienenee jopa 11 %, yhden rakenneosan materiaalmuutoksella. Vähähiilisillä materiaaleilla tilanne on sama. Siinä betonirunkoisin hiilijalanjälki pienenee yläpohjan muutoksella 9 %. Kummassakin tapauksessa teräsrunkoisella ratkaisulla on suurin hiilijalanjälki. Teräsrunkoinen ratkaisu puisella yläpohjalla pienentää hallin hiilijalanjälkeä huomattavasti. Tutkimuksen perusteella erilaiset runkojen yhdistelyt ja hybridirakentaminen ovat suhteellisen hyviä keinoja hiilijalanjäljen pienentämiseen.

Tutkimuksessa vähähiilisinä rakennusmateriaaleina käytetään tällä hetkellä markkinoilla olevia vähähiilisiä markkinoituja tai muuten GWP-arvoltaan vähähiilisempiä rakennusmateriaaleja, verrattuna tavanomaisiin tuotteisiin. Vähähiilisillä materiaaleilla hallin eri runkoratkaisuista eniten hiilijalanjälki pienenee betonirunkoisella hallilla, noin 40 %, tavanomaisiin materiaaleihin verraten. Vähiten hiilijalanjälki pienenee teräsrunkoisella hallilla, mutta siltäkin hiilijalanjälki pienenee noin 31 %. Tutkimuksen perusteella hiilijalanjälkeä saadaan pienennettyä erittäin tehokkaasti vähähiilisillä materiaaleilla.

Tulevaisuuden näkyvät ovat hyviä vähähiilisille materiaaleille. Niitä tulee koko ajan enemmän markkinoille ja niitä tullaan kehittämään vielä lisää. Tutkimuksessa todetaan kuitenkin, etteivät tällä hetkellä markkinoilla olevat vähähiiliset rakennusmateriaalit riitä vastaamaan yritysten ympäristötavoitteita, saati Suomen hiilineutraaliustavoitteisiin. Tulevaisuus näyttää, kuinka pitkälle vähähiilisten materiaalien kehityksellä päästään.

Avainsanat: Hiilijalanjälki, EPD, GWP, rakennuksen elinkaari, elinkaariarviointi, laskenta, hallirakennus

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. HIILIJALANJÄLJEN MUODOSTUMINEN	3
2.1 Rakennuksen elinkaaripäästöjen muodostuminen	4
2.2 Rakennuksen elinkaari.....	6
2.2.1 A1–A3 Tuotevaihe	7
2.2.2 A4 ja A5 Rakentamisvaihe	7
2.2.3 B1–B7 Rakennuksen käyttövaihe	8
2.2.4 C1–C4 Rakennuksen purku ja hävittäminen	8
2.2.5 D Loput päästöt	9
2.2.6 Elinkaaripäästöt	9
2.2.7 Ympäristöselosteet	9
3. TUTKIMUSAINEISTOT JA MENETELMÄT.....	11
3.1 Elinkaariarviointi.....	11
3.2 Päästötiedot.....	12
3.3 Kohderakennuksen esittely	12
3.4 Laskenta rakenteille eri materiaaleilla	14
4. TULOKSET.....	15
4.1 Hiilijalanjälki tavanomaisilla rakennusmateriaaleilla.....	15
4.2 Hiilijalanjälki vähähiilisillä rakennusmateriaaleilla	19
4.3 Käytetyn tietokannan vaikutus tuloksiin ja tulosten vertailu.....	24
5. TULEVAISUUDEN NÄKYMÄT VIHREILLE MATERIAALEILLE	29
6. YHTEENVETO.....	34
LÄHTEET.....	38
LIITE A: RUNKORATKAISUJEN RAKENTEIDEN KOKO- JA MÄÄRÄTIEDOT	40
LIITE B: RUNKORATKAISUJEN RAKENTEIDEN LASKETUT HIILIJALANJÄLJET	46

LYHENTEET JA MERKINNÄT

CO ₂ -ekv.	Hiilidioksidiekvivalentti. Yhteismitta, jota kautta voidaan huomioida kaikkien kasvihuonepäästöjen ilmastoa lämmittävä vaikutus. Kaikki päästöraportoinnissa mitattavat kasvihuonekaasujen määrät muutetaan hiilidioksidiekvivalenteiksi omien kertoimien avulla. Tällöin eri kaasujen ilmastoa lämmittäviä vaikutuksia pystytään vertailemaan. (MTK <i>n.d.</i>)
GWP	engl. Global Warming Potential, suomeksi lämmityspotentiaali. Indeksiksi, joka kertoo aineen kasvihuonehaitallisuuden suhteessa hiilidioksiidiin. Hiilidioksidin GWP-arvo on 1.0 GWP. (Suomen ympäristökeskus 2023)
hiilijalanjälki	Tarkoittaa ihmisen toiminnan aiheuttamia hiilidioksidipäästöjä, jotka voidaan määrittää yrityksille, organisaatioille, toiminnalle tai tuotteelle. Yleensä ilmaistaan hiilidioksidiekvivalenteina (CO ₂ e). (Sitra <i>n.d.</i>)
hiilikädenjälki	Kertoo tuotteen aikaansaamista positiivisista ilmastovaikutuksista. Se lasketaan kahden hiilijalanjäljen erotuksena, kun yrityksen ratkaisulla on pienempi hiilijalanjälki kuin yleisesti olevalla samantyyllisellä ratkaisulla, syntyy hiilikädenjälkeä tälle yrityksen tuotteelle. (Siitonen 2023)
EPD	engl. Environmental Product Declaration, suomeksi ympäristöseloste. Selosteessa esitetään kyseisen tuotteen ympäristövaikutukset verifioidulla ja standardoidulla tavalla. Tiedot perustuvat elinkaarianalyysiin (LCA). (One Click LCA <i>n.d.</i> a)
LCA	engl. Life Cycle Assessment, suomeksi elinkaariarviointi. ISO-standardoitu analyysimenetelmä, jolla arvioidaan ja analysoidaan tuotteen tai palvelun ympäristövaikutukset koko sen elinkaaren ajalta. (Judl <i>et al.</i> 2021, s. 3)
kasvihuonekaasu	Ilmakehässä olevia kaasuja, jotka päästävät auringonsäteilyn lävitseen, mutta absorboivat maan pinnalta tulevaa lämpösäteilyä takaisin. (Sitra <i>n.d.</i>)

1. JOHDANTO

Tilastokeskuksen mukaan Suomen rakennuskanta käsitti vuonna 2022 1,54 miljoonaa rakennusta, kun laskennassa ei huomioida kesämökkejä, maatalous- tai muita talousrakennuksia. Näistä noin 86 % on asuinrakennuksia, jolloin 14 % kattaa loput rakennukset. Näitä ovat esimerkiksi toimistorakennukset, varastorakennukset ja teollisuuden rakennukset. Samaisena vuonna uusia rakennuslupia myönnettiin noin 28 000 kappaletta. (Tilastokeskus 2023)

Suomessa vuonna 2022 Uudistalorakentamisen arvo oli 19,5 miljardia euroa ja korjausrakentamisen arvo oli 15 miljardia euroa. Eli korjausrakentamisen arvo oli noin 4,5 miljardia pienempi kuin uudisrakentamisen arvo. Rakennusten korjaaminen on Suomessa keskeinen ja kasvava rakentamisen sektori, lisäksi sen suhdannevaihtelu on pientä verrattuna uudisrakentamiseen. (Valtiovarainministeriö 2023, s. 21) Uudisrakentamisen suhdannevaihtelu on huomattavaa. Siihen on vaikuttanut erityisesti viime vuosien aikana koronapandemia ja maailman tilanteet.

Rakentaminen on toistaiseksi keskittynyt rakennusten energiatehokkuuden parantamiseen ja käyttöaikaisten päästöjen vähentämiseen. Vuonna 2018 voimaan tulleiden energiamääräysten myötä uudisrakentaminen onkin kehittynyt lähes nollaenergiarakentamiseen. Tämä on ollut hyvää kehitystä, mutta koska Suomessa rakentaminen ja rakennusten käyttö aiheuttavat noin kolmanneksen Suomen kasvihuonepäästöistä, muitakin keinoja on etsittävä. (Ympäristöministeriö *n.d.* b)

Ympäristöministeriön tavoitteena on, että 2020-luvun puoliväliin mennessä rakennusten elinkaaren aikaista hiilijalanjälkeä ohjataan lainsäädännöllä (Ympäristöministeriö *n.d.* c). Ennen sitä rakennusten elinkaaren hiilijalanjäljenlaskenta on täysin vapaaehtoista. Sitä tehdään tosin jo nyt jonkin verran kaupallisten ympäristöluokitusten kannustamina. Kaupallisia ympäristöluokituksia elinkaariarvioinnille ovat muun muassa kansainvälinen LEED, englantilainen BREEAM, Rakennustiedon RTS-luokitus ja GBC Finland ohje.

Tutkimuksessa selvitetään laskennallisin tarkasteluin eri rakenteille eri rakennusmateriaalien kautta syntyvät hiilijalanjäljet. Esimerkkikohteena on hallirakenne, jonka rakenteita, runkoa, nosturin tukirunkoa, alapohjaa, sokkelia, ulkoseinää ja yläpohjaa, tarkastellaan. Näille rakenteille määritetään eri materiaaleilla, betoni, teräs ja puu, elinkaaren aikana syntyvä hiilijalanjälki. Tarkastelun kautta pyritään löytämään rakenteisiin sitoutuneeseen hiilijalanjälkeen vaikuttavat tekijät.

2. HIILIJALANJÄLJEN MUODOSTUMINEN

Kestävä rakentaminen on määritetty Rakennusteollisuus RT ry:n sivuilla olevan rakentamisen ja rakennuksen ekologisien, taloudellisten, ja sosiaalisten näkökulmien huomioon ottamista. Kestävä rakentaminen sisältää sekä ekotehokkuuden, että energiatehokkuuden. Eko- ja energiatehokkuutta voidaan kumpaakin katsoa kahdesta näkökulmasta, ympäristön ja sosiaalisten tekijöiden. Kestävää rakentamista voidaan edellisten lisäksi katsoa taloudellisista näkökulmista (Rakennusteollisuus RT ry *n.d. a*). Kestävästä rakentamisesta puhuttaessa on siis ymmärrettävä, että nämä kaikki näkökulmat on otettava huomioon, eivätkä ne saa vaikuttaa valintoihin toistensa kustannuksella.

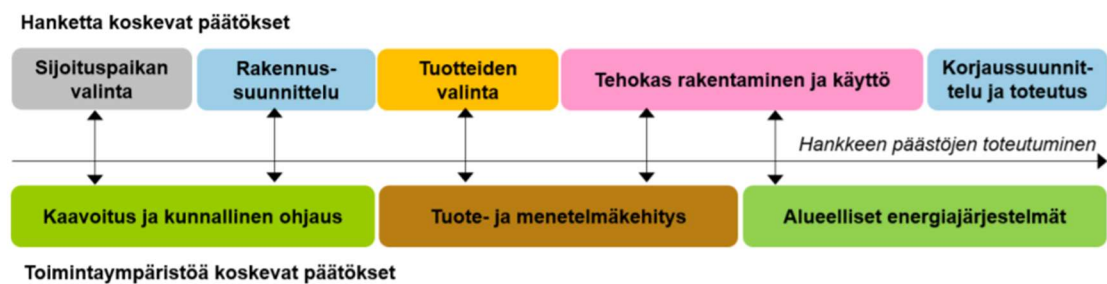
Rakennusten elinkaarta ja siitä syntyviä päästöjä on tarkasteltava ja ohjattava myös kokonaisuutena. Elinkaaripäästöjen vähentäminen on tehtävä koko rakennus huomioiden, siten ettei tapahdu osaoptimointia. (Rakennusteollisuus RT ry *n.d. c*) Elinkaaripäästöjä voidaan laskea elinkaariarvioinnilla eli LCA-menetelmällä. Elinkaariarvioinnilla saadaan arvio rakennuksen elinkaaren aikaisista päästöistä huomioimalla kaikki eri vaiheiden aikana syntyneet päästöt. Elinkaari sisältää materiaalien hankinnan, niiden prosessoinnin ja kuljetuksen, tuotteiden valmistuksen, jakelun, käytön, uudelleenkäytön, huollon, kierrätyksen ja hylkäämisen. Elinkaariarviointia varten on kehitetty erilaisia laskentaohjelmia, kuten One Click -ohjelma. Elinkaariarviointia tukevien laskentaohjelmien kautta saadaan tietoa päästöistä ja pystytään vertailemaan eri rakennusmateriaaleja tai kokonaisia rakennuksia keskenään. Ohjelmat ovat kuitenkin yleensä maksullisia ja näin eivät ole kaikkien saatavilla. Laskentaa voidaan kuitenkin tehdä myös esimerkiksi ihan käsinlaskennalla, tietyn epätarkkuuden puitteissa.

Tässä luvussa käsitellään yleisesti elinkaari- päästöjen muodostumista ja tarkastellaan, miten elinkaari- päästöt lasketaan elinkaaren eri vaiheissa standardin SFS-EN 15804: 2012 *Kestävä rakentaminen. Rakennustuotteiden ympäristöselosteet. Laadinnan yleissäännöt* mukaisesti. Luvussa esitellään kaikki elinkaaren vaiheet A1–3, A4–5, B ja C, joista tutkimuksen laskelmissa otetaan huomioon vain A- ja C-moduulit. Tutkimuksessa B-moduuli eli käyttövaiheen päästöt jätetään huomioimatta, koska niiden arviointi tutkimuksessa ei suoranaisesti tarkenna tutkimuksen materiaali ja eri ratkaisujen välillä olevaa vertailua. B-moduulin päästöt syntyvät käyttövaiheen päästöistä eli tuotteen käytöstä rakennuksessa, kunnossapidosta, korjauksista, osien vaihdosta, laajamittaisista korjauksista, energian käytöstä ja veden käytöstä (Ympäristöministeriö 2019, s. 14). Näiden

osalta esimerkiksi todellisen energian kulutuksen ja veden käytön arviointi olisi suhteellisen epätarkkaa, eikä näin tuo eri rakennusten välille vertailtavuutta.

2.1 Rakennuksen elinkaari päästöjen muodostuminen

Elinkaaren aikana eri vaiheiden vaikutus valmiin rakennuksen ympäristövaikutuksiin pienenee suunnittelun ja rakentamisen myötä. Jos halutaan vaikuttaa rakennuksen elinkaaren ympäristövaikutuksiin, se täytyy ottaa huomioon jo rakennusprojektin suunnittelu- vaiheessa. Bionova Oy (2017) kuvaa tiekartassaan hankkeen päästöjen toteutumista hanketta koskevien päätösten kautta.

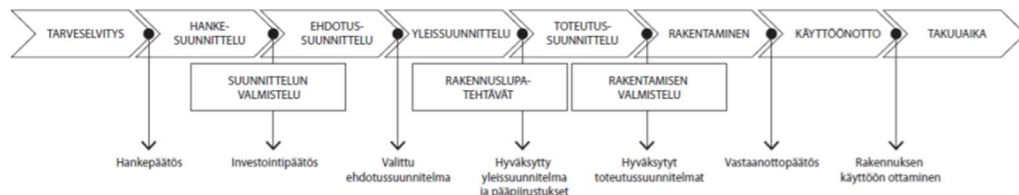


Kuva 1: Yksittäisen rakennusprojektin päästöjen kasvu päätösten myötä. (Bionova Oy 2017, s. 14)

Kuva 1 kuvastaa, sitä miten rakennushankkeen päästöt käyvät toteen erillisten päätösten myötä. Hankkeen aikana on monia päätöksiä, joiden kautta hankkeen päästöjä voidaan joko kasvattaa, hillitä tai jopa vähentää. Kuvan kautta voidaan ymmärtää, miten suunnittelu- ja rakennusvaiheessa päästöjen suuruuteen voidaan vaikuttaa projektin edetessä yhä vähemmän. Käyttö- ja ylläpitovaiheessa päästöihin voidaan koko ajan vaikuttaa yhtä vahvasti, mutta suuruudeltaan vaikutus on pienempää kuin verrattuna esimerkiksi suunnitteluvaiheeseen. Rakennuksen ympäristövaikutuksiin voidaan vaikuttaa parhaiten suunnitteluvaiheessa.

Rakentamisessa päästöihin voidaan vaikuttaa ohjauksen kautta, joka tapahtuu kahdella tapaa: suoraan rakennushankkeen päästöjen ohjauksella tai muulla ohjauksella. Rakennushankkeen päästöjen ohjaus alkaa sääntelystä ja kaavoituksesta. Muulla ohjauksella tarkoitetaan muun muassa rakennustuotteisiin tai sijoitukseen kohdistuvaa ohjausta. (Bionova Oy 2017, s. 26)

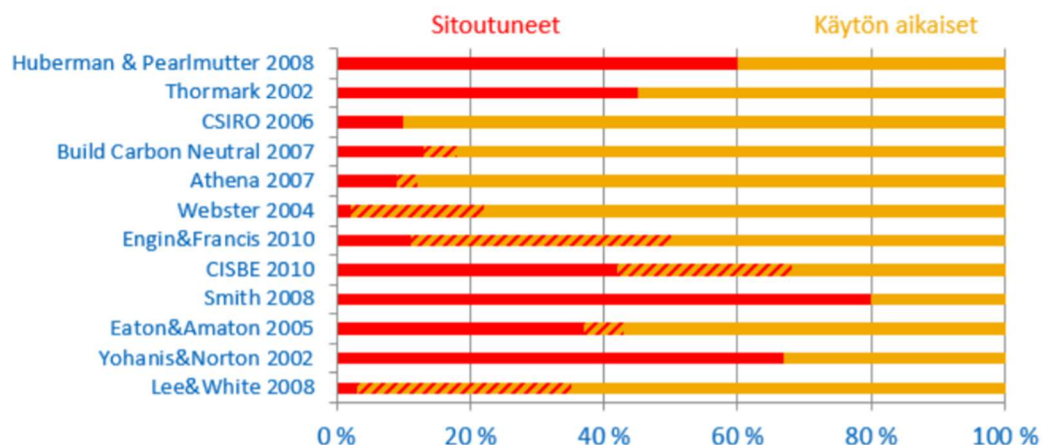
Rakennushankkeen vaiheiden tasolla tietyt päätökset ovat tärkeitä rakennuksen elinkaaren päästöjen kannalta. Rakennushankkeen vaiheet ovat kuvan 2 mukaisesti tarveselvitys, hankesuunnittelu, ehdotussuunnittelu, yleissuunnittelu, toteutussuunnittelu, rakentaminen, käyttöönotto ja takuu-aika.



Kuva 2. Rakennushankkeen kulku. (Bionova Oy 2017, s. 27)

Tarveselvityksessä merkittävin päätös syntyy sijoituspaikan valinnan kautta. Sijoituspaikan valinnalla voidaan vaikuttaa käyttäjien liikkumistapoihin ja liikkumisen määrään, sekä energiahuollon ja maanrakentamisen tarpeeseen. Hankesuunnitteluvaiheessa päästöjen kannalta merkittävimmät päätökset syntyvät rakennuksen muunneltavuuden, massoittelem, energiaratkaisujen ja materiaalien valinnoissa. Yleis- ja toteutussuunnitteluvaiheissa taas päästöjen määrään vaikuttavat rakenteiden ja materiaalien valinnat ja niiden optimointi, sekä energiasuunnittelu. Rakentamisvaiheessa päästöjä voidaan pienentää valitsemalla vähäpäästöisiä tuotteita, minimoimalla hukkamateriaaleja ja suosimalla energiatehokkaita ratkaisuja. Tässä vaiheessa on tehokasta myös päästöjen kannalta suosia esivalmistusta. Käyttövaiheessa päästöjen määrään voidaan vaikuttaa varmistamalla järjestelmien oikea käyttö ja niiden toimivuus. (Bionova Oy 2017, s. 27)

Rakennusten elinkaaren hiilijalanjäljestä materiaalien osuus on merkittävä. Se nousee esille myös kansainvälisestä tutkimuskoosteesta (kuva 3). Tutkimuskoosteesta on vertailtu sekä rakennusten sitoutuneen energian ja päästöjen, että käytönaikaisen energiankulutuksen ja päästöjen osuuksia. (Bionova Oy 2017, s.12)

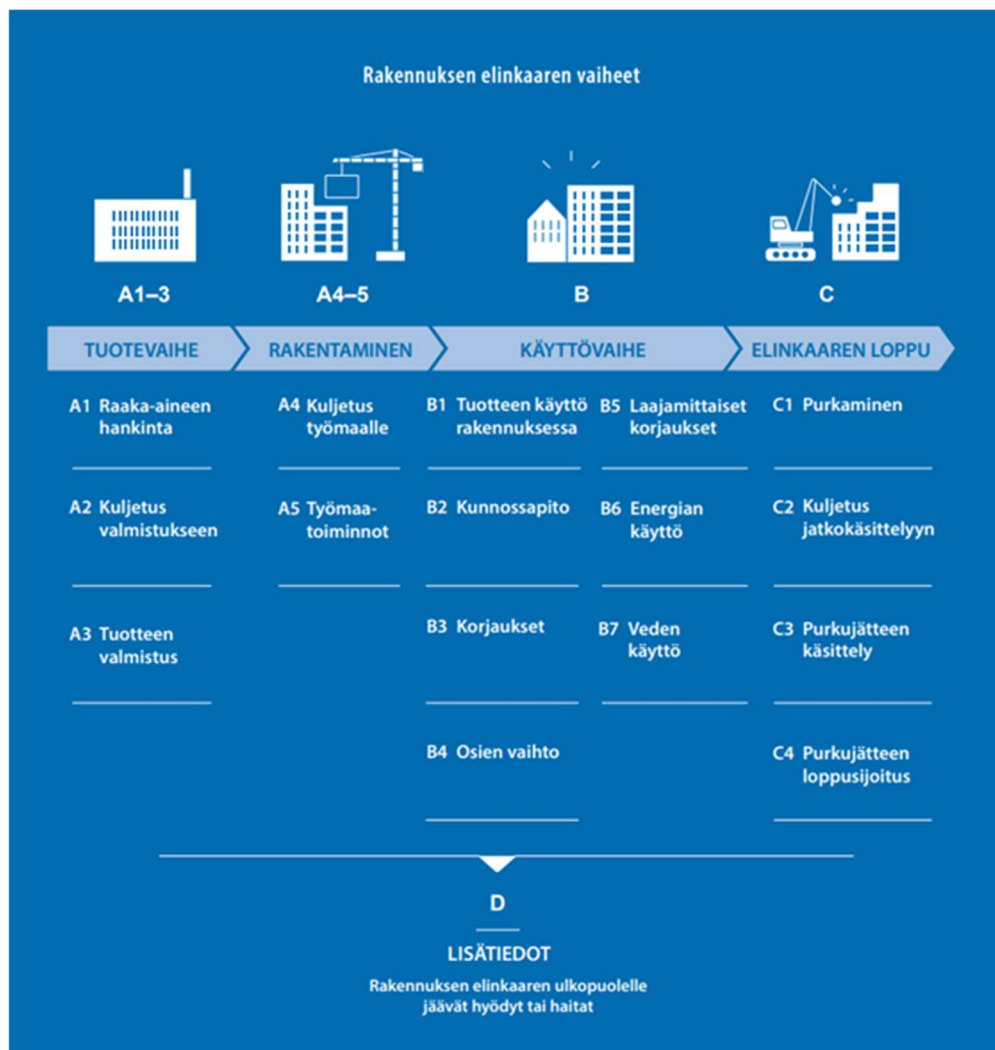


Kuva 3: Kooste kansainvälisistä tutkimuksista sitoutuneiden ja käytönaikaisten päästöjen osuuksista (Bionova Oy 2017, s. 12).

Kuvan 3 mukaan rakennusmateriaaleihin sitoutuneet päästöt ovat luokkaa 20 % – 30 % rakennuksen elinkaaripäästöistä. Muut päästöt muodostuvat suurimmaksi osaksi (70 %–80 %) rakennuksen käyttöaikaisesta energian kulutuksesta. Materiaalien suhteellinen osuus hiilijalanjäljestä myös kasvaa koko ajan rakennusten kasvavan energiatehokkuuden takia (Bionova Oy 2017, s. 55). Energiatehokkuuden tavoittelu ja materiaalien optimointi ovat molemmat toimenpiteitä kokonaispäästöjen vähentämiseksi ja ne toimenpiteet tulisikin aina toteuttaa kummatkin näkökulmat huomioiden.

2.2 Rakennuksen elinkaari

Kestävän rakentamisen lähtökohtana on rakennuksen elinkaari. Kuva 4 esittää rakennuksen elinkaaren eri vaiheet standardin SFS-EN 15804: 2012 mukaan. Elinkaari määritetään viiden eri päämoduulin kautta. Päämoduulit ovat tuotevaihe, rakentamisvaihe, rakennuksen käyttövaihe, rakennuksen purku ja hävittäminen ja viimeisenä loput päästöt.



Kuva 4. Rakennuksen elinkaaren vaiheet moduuleina. (Ympäristöministeriö 2019, s. 14)

Rakennukset ovat erilaisia. Niillä on eri käyttötarkoituksia, eri odotuksia kestävyyksille ja näin myös erilaisia elinkaaria (Rakennusteollisuus RT ry *n.d.* b). Tämän perusteella jokaisen rakennuksen elinkaari on tarkasteltava erikseen, jotta niiden päästöt voidaan arvioida. Jokaisen erilaisen rakennuksen elinkaaresta voidaan kuitenkin yläkäsitteenä tunnistaa yleiset elinkaaren vaiheet eli kuvan 2 moduulit.

2.2.1 A1–A3 Tuotevaihe

Rakennuksen elinkaaren päävaiheista ensimmäinen, A1–A3 tuotevaihe, koostuu kolmesta moduulista, jotka ovat A1 raaka-aineen hankinta, A2 kuljetus valmistukseen ja A3 tuotteen valmistus. Kokonaisuudessaan tuotevaihe sisältää kaikkien materiaalien, tuotteiden ja energian hankinnan, moduuleissa syntyvän jätteen loppusijoitukseen asti. Jos jäte ei mene loppusijoitukseen vaan uusiokäyttöön, tuotevaihe ottaa huomioon päästöt uusiokäyttövaiheeseen saakka. (SFS-EN 15804 2012, s.18)

Tuotevaiheen ensimmäisessä moduulissa, A1 raaka-aineiden hankinta, otetaan huomioon prosessit, joilla materiaalia on hankittu. Tällaisia ovat muun muassa erilaiset kaivosprosessit ja metsänhoidon toiminnot. Raaka-aineiden hankinnasta aiheutuvien päästöjen lisäksi tässä moduulissa huomioidaan kokonaisuudessaan tarvittu sähköntuotanto. Moduulissa A2, kuljetus valmistukseen, arvioidaan materiaalien kuljetukset valmistukseen. Se sisältää kuljetuksen tehtaan porteille, mutta myös kaikki tarvittavat sisäiset kuljetukset. Kolmannessa moduulissa A3, tuotteen valmistus, otetaan huomioon kaikki materiaalit, joita valmis tuote tarvitsee. Se sisältää niin tuotteiden kuin sivutuotteiden tuotannon, esivalmisteiden tuotannon, apumateriaalit, pakkausmateriaalin valmistuksen kuin myös pakkausprosessin. (SFS-EN 15804 2012, s. 23 ja 24)

2.2.2 A4 ja A5 Rakentamisvaihe

Rakentamisvaihe koostuu moduuleista A4 ja A5. A4-moduulissa otetaan huomioon materiaalien kuljetukset työmaille. Tämä moduuli sisältää kaikkien rakennustuotteiden, materiaalien ja maamassojen kuljetukset rakennustyömaille. Vaiheessa otetaan huomioon myös mahdolliset välivarastointi- tai esivalmistuspaikat. (Ympäristöministeriö 2019, s.23)

A5-moduulissa huomioidaan työmaantoimintoja. Tässä moduulissa hiilijalanjäljen suuruutta lasketaan kulutetun ostoenergian ja polttoaineiden päästöjen kautta. Tähän energia-arvioon sisällytetään kaikki energiantarve rakennustöistä, työmaan valaistuksesta,

kuivatuksesta, lämmityksestä, toimisto- ja taukotilojen käytöstä sekä muista vastaavista toimista. (Ympäristöministeriö 2019, s.27)

2.2.3 B1–B7 Rakennuksen käyttövaihe

Kaikki B-vaiheen moduulit kuuluvat käytön vaiheeseen. B1–B5 moduulit ovat rakennukseen liittyviä informaatiomodulleja, joissa keskitytään käyttövaiheessa tarvittaviin tuotteisiin ja materiaaleihin. Moduulit B6 ja B7 ovat taas rakennuksen toimintaan liittyviä informaatiomodulleja, joissa käsitellään rakennukseen integroitujen laitteiden energian ja veden kulutusta. (SFS-EN 15804 2012, s. 25–27) Tätä moduulia ei tulla huomioimaan tässä tutkimuksessa.

2.2.4 C1–C4 Rakennuksen purku ja hävittäminen

C-moduuli käsittelee rakennuksen purkuvaihetta. Purkuvaihe sisältää neljä moduulia, C1–C4, jotka käsittelevät purkamisen, purkuvaiheen kuljetukset, purkujätteen käsittelyn ja purkujätteen loppusijoittelun. (SFS-EN 15804 2012, s. 28) C-moduuli ja seuraavaksi tuleva D-moduuli muodostavat rajan, jossa kierrätysmateriaalit ja tuotteet saavuttavat end-of-waste-tilan. End-of-waste-tila tarkoittaa materiaalille tilannetta, jossa se joko muuttuu jätteeksi tai se muuttuu End-of-waste-menettelyn kautta uudelleen käytettäväksi tuotteeksi. (Kierrätysteollisuus ry 2019)

C1-moduulissa huomioidaan materiaalien, tuotteiden ja rakennusosien purkamisesta, irrottamisesta tai niiden korvaamisesta aiheutuvat vaikutukset. Tällöin huomioidaan myös jätteiden työmaa-aikainenlajittelu. (SFS-EN 15804 2012, s. 28) Purkuvaiheen kuljetukset lukeutuvat moduuliin C2. Siinä huomioidaan moduulissa C1 käsiteltyjen poistettujen materiaalien, tuotteiden tai rakennusosien kuljetus pois rakennukselta. Tällaisia kuljetuksia ovat jätteen kuljetus loppusijoitukseen tai kierrätysmateriaalin kuljetus käsittelypaikalle. (SFS-EN 15804 2012, s. 28) C3-moduulissa käsittää purkujätteen käsittelyn. Purkujätteen käsittely tarkoittaa jätteiden keräämistä purkutyömailta, materiaalivirtojen jätteenkäsittelyä uudelleenkäyttöä, materiaalkierrätystä ja energiasisällön hyödyntämistä varten. Tässä kohtaa katsotaan myös, voidaanko kyseiset materiaalit hyödyntää kierrätyspolttoaineena energianpolttolaitoksessa. Tällaiset materiaalit, jotka hyväksytään energianpolttolaitokseen kierrätyspolttoaineiksi tai päätyvät kierrätysmateriaaleiksi tai ovat uudelleen käytettäviä tuotteita, ovat moduulissa C saavuttaneet end-of-waste-tilan.

(SFS-EN 15804 2012, s. 28) C4-moduuli sisältää purkujätteen loppusijoituksen, sisältäen fysikaalisen esikäsittelyn ja loppusijoituspaikan ylläpidon (SFS-EN 15804 2012, s. 28).

2.2.5 D Loput päästöt

Moduuli D sisältää elinkaaren ulkopuoliset vaikutukset eli niin sanotusti viimeiset päästöt. Ne ovat arvioituja nettovaikutuksia uudelleenkäytöstä, hyödyntämisestä ja kierrätyksestä. (SFS-EN 15804 2012, s.19) Nämä vaikutukset ovat positiivisia hiilidioksidipäästöihin eli näillä vaikutuksilla otetaan uudelleen käytöstä tulevat pienentävät tekijät huomioon. Tätä moduulia ei tulla huomioimaan tässä tutkimuksessa.

2.2.6 Elinkaaripäästöt

Rakennuksen elinkaaripäästöjä voidaan laskea elinkaariarvioinnilla eli LCA-menetelmällä. Elinkaariarvioinnilla saadaan arvio rakennuksen elinkaaren aikaisista päästöistä, huomioimalla kaikki eri vaiheiden aikana syntyneet päästöt. Elinkaari sisältää materiaalien hankinnan, niiden prosessoinnin ja kuljetuksen, tuotteiden valmistuksen, jakelun, käytön, uudelleenkäytön, huollon, kierrätyksen ja hylkäämisen. Kokonaisen rakennuksen elinkaaren eri vaiheiden aikana syntyneitä ympäristövaikutuksia voidaan siis näin tarkastella rakennustuote ja -materiaali tasolla.

Elinkaariarviointia varten on kehitetty myös erilaisia laskentaohjelmia, kuten muun muassa One Click -ohjelma. One Click LCA on rakennusten hiilijalanjäljen laskentaohjelma. Se on tehty EN-standardin SFS-EN 15804 2012 pohjalta, johon myös Ympäristöministeriön (2019) rakennuksen vähähiilisyden arviointimenetelmä perustuu. Standardi SFS-EN 15804 on tehty rakennusmateriaaleille ja se käsittelee kestävästä rakentamisesta, rakennustuotteiden ympäristöselosteita ja laadinnan yleissääntöjä. Elinkaariarviointia tukevien laskentaohjelmien kautta saadaan tietoa päästöistä ja pystytään vertailemaan eri rakennusmateriaaleja tai kokonaisia rakennuksia keskenään. (One Click LCA *n.d.* b)

2.2.7 Ympäristöselosteet

Rakennustuotteiden ympäristöselosteet ovat nimeltään EPD. Sanan kirjaimet tulevat sanoista Environmental Product Declaration. Se on määritelty Labwallin sivuilla seuraavasti: ” EPD on elinkaarianalyysiin perustuva, vapaaehtoinen ja standardoitu tapa esittää luotettavasti olennaiset, varmennetut ja vertailukelpoiset tiedot valmistetun tuotteen tai

tuoteryhmän ympäristövaikutuksista” (Labwall 2020). Sillä pyritään kuvaamaan tuotteen ympäristövaikutuksia mahdollisimman hyvin.

Ympäristöselosteessa kerrotaan tuotteen perustiedot, kuten tuotteen valmistaja, tuotteen nimi ja muut tunnistetiedot, sen käyttötarkoitus ja materiaalit. Tärkeimpänä osiona ympäristöselostetta on sen esittämät GWP-arvot tuotteen elinkaaren eri vaiheiden mukaan, eli moduuleihin ryhmiteltynä. (SFS-EN 15804 2012, s.36–38) GWP tarkoittaa ilmaston lämmityspotentiaalia eli ominaislämmitysvaikutusta (SFS-EN ISO 14067: 2018 Kasvihuonekaasut. Tuotteiden hiilijalanjälki. Hiilijalanjäljen laskemista koskevat vaatimukset ja ohjeet, s. 13). Nämä ympäristötiedot ympäristöselosteessa on laskettu ja koottu elinkaarianalyysilla eli standardoidulla LCA-menetelmällä, jolloin seloste käsittää koko tuotteen elinkaaren. Tällöin siinä on pyritty huomioimaan tuotteen ympäristövaikutukset niin raaka-ainehankinnasta loppusijoitukseen asti. (Rakennustieto *n.d.*) Ympäristöselosteessa pyritään kuvaamaan tuotteen ympäristövaikutuksia mahdollisimman hyvin. Yritysten julkaisemista ympäristöselosteista saatavat EPD-tiedot ovat yleensä hyvin kattavia.

3. TUTKIMUSAINEISTOT JA MENETELMÄT

Tässä tutkimuksessa tarkastellaan hallirakennuksen hiilijalanjäljen muodostumista. Hallirakennusta tarkastellaan rungon rakenneosien tarkkuudella, sekä kolmella eri rungon materiaalilla. Rakennusosat ovat hallin runko, hallissa olevan nosturin tukirunko, perustukset, alapohja, sokkeli, yläpohja ja ulkoseinät. Runkomateriaaleina tutkitaan terästä, betonia ja puuta.

Tutkimuksessa lasketaan kaikille runkoratkaisuille syntyvät hiilidioksidipäästöt. Tutkimuksessa pyritään saamaan selville, miten hallin rungon materiaalin vaihto vaikuttaa hallin kokonaishiilijalanjälkeen ja kuinka paljon materiaalmuutokset rakenneosatasolla vaikuttavat kokonaishiilijalanjälkeen. Näitä laskentatuloksia vertailemalla tiedetään paremmin, mihin rakenteeseen olisi ympäristövaikutusten kannalta kannattavampaa käyttää mitäkin materiaalia. Näin ymmärretään paremmin valintojen vaikutuksia hiilijalanjäljen suuruuteen. Tässä luvussa kerrotaan kokeellisessa tutkimuksessa käytetyt tutkimusaineistot ja tutkimusmenetelmät. Hallirakennus esitellään tarkemmin luvussa 3.3.

3.1 Elinkaariarviointi

Tutkimuksen hiilijalanjälkilaskelmat tehdään elinkaariarvioinnin mukaisesti. Tutkimuksen elinkaariarviointilaskelmissa huomioidaan vain A- ja C-moduulit. A-moduuli kattaa tuote- ja rakentamisvaiheet ja C-moduuli ottaa huomioon elinkaaren loppuvaiheen. Nämä ovat vertailun suhteen tärkeitä vaiheita, kun taas C-moduulin arvot käyttövaiheesta, eivät tuo suurta vaihtelua vertailtavien materiaalien välille ja näin ei anna lisäarvoa tutkimukseen. D-moduulia ei myöskään ole tarpeen ottaa huomioon, koska rakennuksen elinkaaren ulkopuolelle jäävistä hyödyistä ja haitoista ei ole tietoa.

Laskelmat tehdään Excel-ohjelmalla, materiaalien EPD-tietojen perusteella, sekä kohderakennuksen rakenteiden määrätietojen mukaisesti. Laskennan määrätiedot ovat esitettyinä liitteessä A. Laskelmissa vertaillaan tavanomaisten ja vähähiilisten materiaalien hiilijalanjälkiä, sekä päästötietokannan arvoja (CO2data.fi) eri rakenteissa. Lisäksi vertaillaan eri runkoratkaisuja keskenään niiden kokonaishiilijalanjälkien suhteen. Vertailussa on tällöin rakenteelle parhaiten sopivat materiaalit ja eri tietolähteiden vaikutus hiilijalanjäljen suuruuteen.

3.2 Päästötiedot

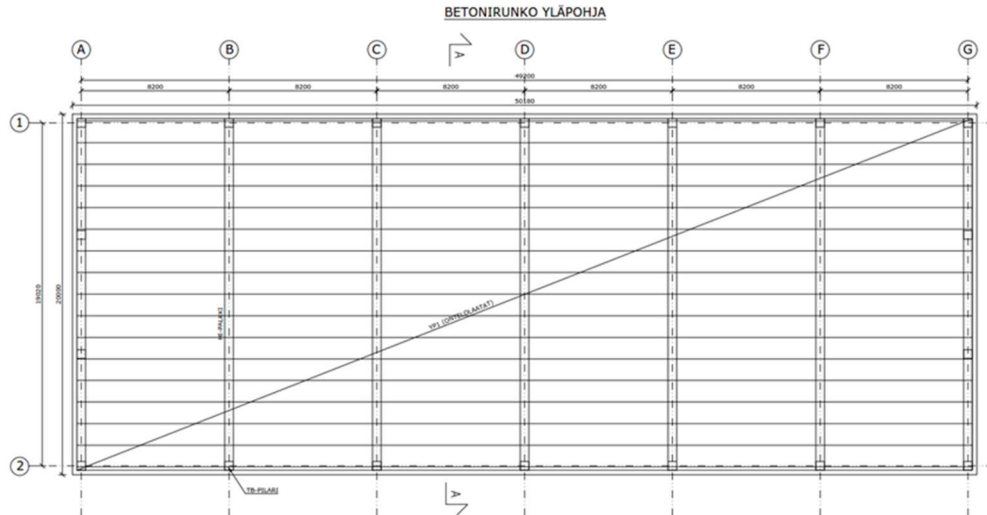
Tutkimusaineisto koostuu kohderakennuksen materiaali- ja määrätiedoista. Rakennusmateriaaleihin sitoutunut hiilijalanjälkitarkasteluissa käytettävät päästötiedot haetaan Ympäristöministeriön julkaisemasta Rakentamisen päästötietokannasta (CO2data.fi) sekä yritysten julkaisemista ympäristöselosteista.

Ympäristöministeriön Rakentamisen päästötietokannasta (CO2data.fi) löytyy Suomessa yleisesti käytössä olevien rakennusmateriaalien keskimääräiset päästötiedot. Sivuston tavoitteena on yhtenäistää rakennusten koko elinkaaren aikaisten ilmastovaikutusten laskentaa, jonka takia siellä ei käsitellä rakennusmateriaaleja tuotetasolla. (Suomen ympäristökeskus 2022) Tässä tutkimuksessa tietokannasta käytetään rakennusmateriaaleille tyypillistä arvoa, eli arvoa, jossa ei ole huomioituna konservatiivista kerrointa. Työmaalla tapahtuvaa materiaalihukkaa kuvaavaa kerrointa ei oteta myöskään huomioon tässä laskennassa.

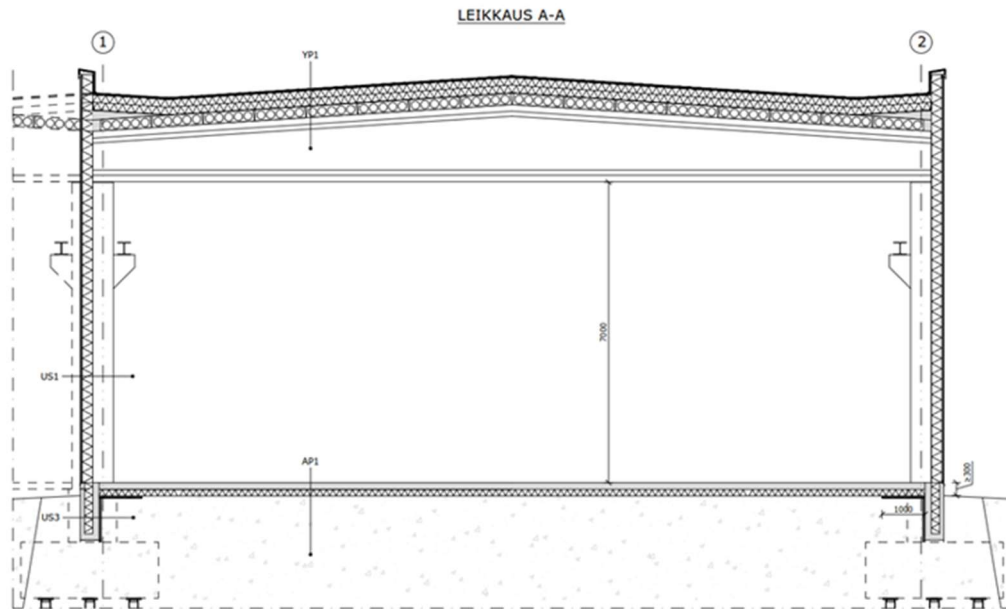
Tässä tutkimuksessa käytetyt valmistajien tuotekohtaiset ympäristöselosteet on otettu suoraan valmistajien sivuilta, sekä Rakennussäätiön Rakennustiedon sivuilla julkaistujen RTS EPD-ympäristöselosteiden haun kautta. Rakennustiedon sivuilla on julkaistuna eri tuotevalmistajien tuotekohtaisia EPD-ympäristöselosteita, jotka ovat samoja kuin valmistajien sivuilta löytyvät. Tässä tutkimuksessa käytetään muun muassa seuraavien valmistajien tuotekohtaisia ympäristöselosteita: Ruukki, Finnfoam, Paroc, WISA ja Rudus.

3.3 Kohderakennuksen esittely

Kohderakennus on teollisuushalli, joka koostuu kehä rakenteesta. Se on kokonaispinta-alaltaan noin 1000 m² ja sen sisällä on siltanosturi. Kuvista 5 ja 6 saadaan yleiskäsitys kohderakennuksen koosta ja mallista. Halli toteutetaan tutkimuksessa betoni-, teräs- ja puurunkoisena, sekä yhdistelmällä; betonirunko ja puukatto, teräsrunko ja puukatto, sekä yhdistetty runko. Yhdistetyssä runkoratkaisussa on teräsristikot, teräsbetonipilarit, sekä yläpohjana puiset kattoelementit.



Kuva 5: Kohderakennuksen yläpohjapiirustus.



Kuva 6: Kohderakennuksen yläpohjapiirustuksesta leikkaus A-A.

Kuva 5 on kohderakennuksen yläpohjapiirustus betonirunkoisena. Hallin lyhempi sivu on 20 m ja pidempi sivu on noin 50 m leveä. Lisäksi hallissa on kehärakenteita 8,2 m välein, yhteensä seitsemän kappaletta, kuvan 5 mukaisesti. Kuvassa 6 on esitetty kohderakennuksen vaakasuuntainen leikkaus betonirunkoiselle hallille. Rakennus on 9,8 m korkea ja on perustettu betonisilla paaluanturoilla. Betonirunkoisena hallissa on teräsbetonipilarit ja HI-kattorapalkit. Muissa runkovaihtoehtoissa pilarit ja kattorakenteet muuttuvat materiaalille tyypilliseen ratkaisuun: teräsrunkoisessa hallissa runko koostuu liittopilareista ja teräskattoristikoista, sekä puurunkoisessa hallissa on liimapuupilarit ja liimapuuharjapalkit. Rakenteiden määrätiedot on esitettyinä liitteessä A.

3.4 Laskenta rakenteille eri materiaaleilla

Laskennassa selvitetään eri runkoratkaisuiden avulla rakennettujen hallien hiilijalanjäljet hiilidioksidiekvivalentteina. Laskenta tehdään Excelillä eri runkoratkaisuille, jotka on esitetty luvussa 3.3. Laskenta perustuu materiaalien hiilidioksidiekvivalenttien summaan materiaalien määrän mukaan. Materiaalien hiilidioksidiekvivalenttien määrät eli GWP-arvot saadaan materiaalien EPD-selosteista, joita käsitellään luvussa 3.2. Laskennassa huomioidaan A ja C-moduulit, joita esitellään tarkemmin luvussa 3.1. Rakenteiden sisältämien materiaalien määrätiedot esitetään liitteessä A.

Tutkimuksen laskenta on toteutettu alla olevan kuva 7 mukaisesti. Jokaisen rakennesosan hiilijalanjälki on laskettu sen sisältämien materiaalien GWP-arvojen perusteella. Esimerkiksi teräsrankorungon materiaaleihin kuuluvat lämmöneriste, tuulensuojalevy, kipsilevy, höyrynsulkumuovi, teräsjulkisivuverhous, sekä teräsrunko. Näille kaikille materiaaleille on taulukoon kirjattu niiden GWP-arvot moduuleittain. GWP-arvot on kirjattu lähtökohtaisesti pinta-alaa kohden, mutta esimerkiksi teräksellä se on kannattavampaa merkitä massaa kohden. Kuvan 7 taulukon tulos kuvaa teräsrankorungon hiilijalanjälkeä yhtä neliöpinta-alaa kohden. Tämän jälkeen laskennassa kokonaisen hallirakennuksen teräsrankorungon hiilijalanjälki saadaan kertomalla tämä kyseinen arvo hallin ulkoseinien pinta-alalla. Kokonaisen hallirakennuksen kokonaishiilijalanjälki saadaan, kun laskennassa huomioidaan tällä tavoin kaikki rakennuksen rakennesosat.

Elinkaaren vaihe	Resurssi	Määrä	Yksikkö	Ilmaston lämpeneminen kg CO2e	Yhteensä kg CO2e
US 2, teräsrankorunko:					
Teräsrankorunko, mineraalivillaeriste 225 mm, tuulensuojamineraalivilla, metalliverhous					
A1-A3	Eriste, kivivilla/mineraalivilla, Paroc eXtra	1	m2	2,56	
A1-A3	Eriste, tuulensuojalevy, kivivilla/mineraalivilla, Paroc Cortex, 30mm	1	m2	4,01	
A1-A3	Kipsilevy, tavallinen, yleinen, 6.5 - 25 mm, 10.725 kg/m2 (for 12.5 mm), 858 kg/m3	1	m2	3,07	
A1-A3	Plastic film for damp proofing, 12 / 15 / 20 mm, RaniMoBar (Rani Plast)	1	m2	0,49	
A1-A3	Teräsjulkisivulevy, maalattu (Ruukki)	1	m2	25,83	
A1-A3	Teräs, kuumasinkitty (Ruukki)	2,72	kg	7,06	
A1-A3	Teräs, kuumasinkitty (Ruukki)	5,1	kg	13,24	56,26
A4	Eriste, kivivilla/mineraalivilla, Paroc eXtra	1	m2	0,10	
A4	Eriste, tuulensuojalevy, kivivilla/mineraalivilla, Paroc Cortex, 30mm	1	m2	0,05	
A4	Kipsilevy, tavallinen, yleinen, 6.5 - 25 mm, 10.725 kg/m2 (for 12.5 mm), 858 kg/m3	1	m2	0,03	
A4	Plastic film for damp proofing, 12 / 15 / 20 mm, RaniMoBar (Rani Plast)	1	m2	0,00	
A4	Teräsjulkisivulevy, maalattu (Ruukki)	1	m2	0,31	
A4	Teräs, kuumasinkitty (Ruukki)	2,72	kg	0,09	
A4	Teräs, kuumasinkitty (Ruukki)	5,1	kg	0,17	0,75
B1-B5	Plastic film for damp proofing, 12 / 15 / 20 mm, RaniMoBar (Rani Plast)	1	m2	0,49	0,49
C1-C4	Eriste, kivivilla/mineraalivilla, Paroc eXtra	1	m2	0,04	
C1-C4	Eriste, tuulensuojalevy, kivivilla/mineraalivilla, Paroc Cortex, 30mm	1	m2	0,06	
C1-C4	Kipsilevy, tavallinen, yleinen, 6.5 - 25 mm, 10.725 kg/m2 (for 12.5 mm), 858 kg/m3	1	m2	0,49	
C1-C4	Plastic film for damp proofing, 12 / 15 / 20 mm, RaniMoBar (Rani Plast)	1	m2	0,47	
C1-C4	Teräsjulkisivulevy, maalattu (Ruukki)	1	m2	0,05	
C1-C4	Teräs, kuumasinkitty (Ruukki)	2,72	kg	0,13	
C1-C4	Teräs, kuumasinkitty (Ruukki)	5,1	kg	0,25	1,49
Kaikki					58,99

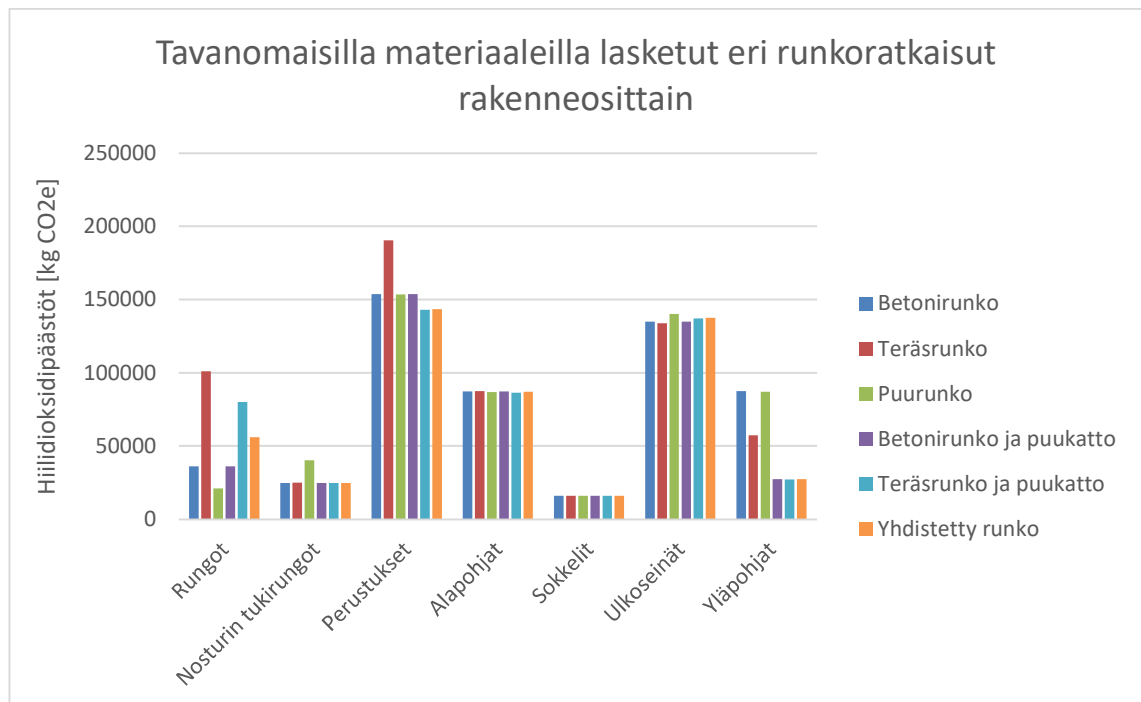
Kuva 7: Esimerkkitaulukointi teräsrankorungon hiilijalanjäljen laskentatavasta.

4. TULOKSET

Tässä luvussa käsitteellään tutkimuksen saamia tuloksia kuvaajien avulla. Tuloksia käsitellään tavanomaisten ja vähähiilisten materiaalien näkökulmasta, sekä tutkitaan tietokanan merkitystä tuloksiin. Myös rakenteiden muutosten vaikutusta hiilijalanjälkeen arvioidaan. Tutkimuksen tulokset hiilijalanjäljistä on tarkemmin esitettyä liitteessä B. Tulokset on esitettyä jokaiselle runkoratkaisulle rakenneosien tarkkuudella. Arvot on pyöristetty tuhannen tarkkuuteen.

4.1 Hiilijalanjälki tavanomaisilla rakennusmateriaaleilla

Ensimmäisenä laskennassa on tarkastelussa perustapaus. Perustapauksessa hallirakennuksen rungon materiaalivalinnoissa on käytetty tavanomaisia rakennusmateriaaleja. Laskennan tulokset näkyvät kuvissa 8 ja 10. Kuvassa 8 on esitettyä tavanomaisilla rakennusmateriaaleilla lasketut hiilijalanjäljet eri runkoratkaisuilla rakenneosittain. Kuvasta tulee hyvin ilmi, miten rakenneosilla on hyvin erisuuruiset hiilijalanjäljet. Tämä selittyy rakenneosien painon perusteella. Mitä enemmän materiaalia rakenneosa sisältää, sitä suurempi hiilijalanjälki sillä todennäköisesti on. Tähän vaikuttaa merkittävästi rakenneosien sisältämät eri materiaalit ja niiden valmistamisen hiilijalanjälki.

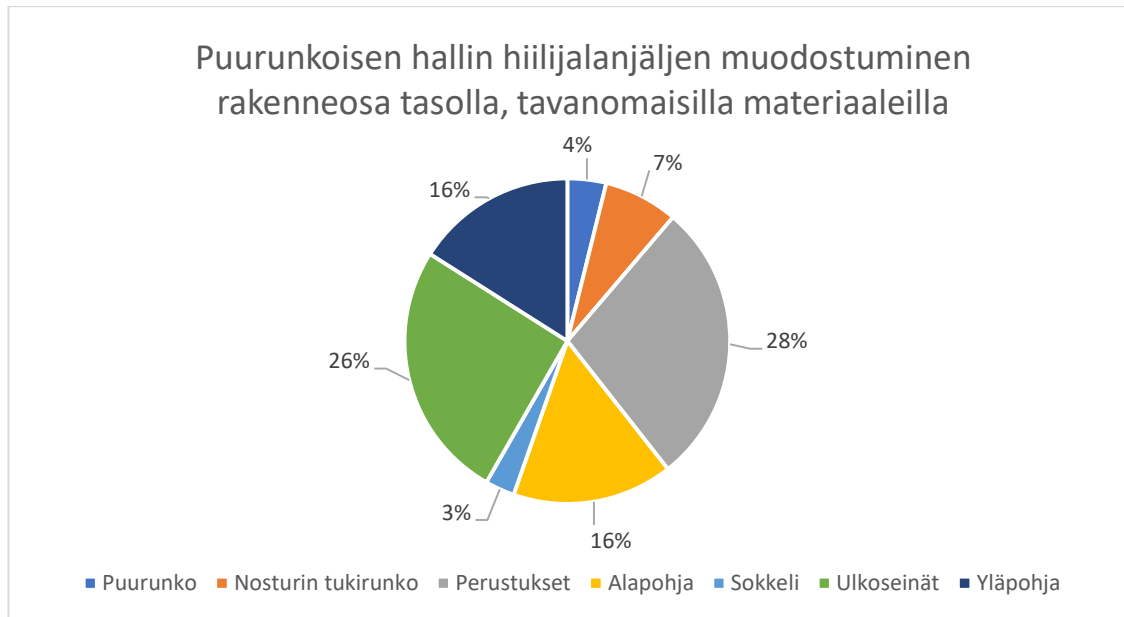


Kuva 8: Tavanomaisilla materiaaleilla lasketut eri runkoratkaisut rakenneosittain.

Laskennan mukaan rungon rakenneosista perustuksille tulee suurin hiilijalanjälki ja sokkeleille pienin. Perustusten suuri hiilijalanjälki syntyy niihin käytetystä betonista ja rakenteen suuresta koosta. Perustusten välillä oleva pieni ero hiilijalanjäljissä syntyy eri runkoratkaisujen seurauksena. Laskennasta saadaan perustuksille seuraavia arvoja: teräsrunkoisen hallin hiilijalanjälki perustuksille on noin 191 000 kg CO₂e, betonirunkoiselle 154 000 kg CO₂e ja yhdistetylle rungolle 143 000 kg CO₂e. Sokkeleiden pieni hiilijalanjälki syntyy niiden pienestä koosta, esimerkiksi verrattuna perustuksiin. Kaikkien sokkealien hiilijalanjäljet ovat noin 16 000 kg CO₂e.

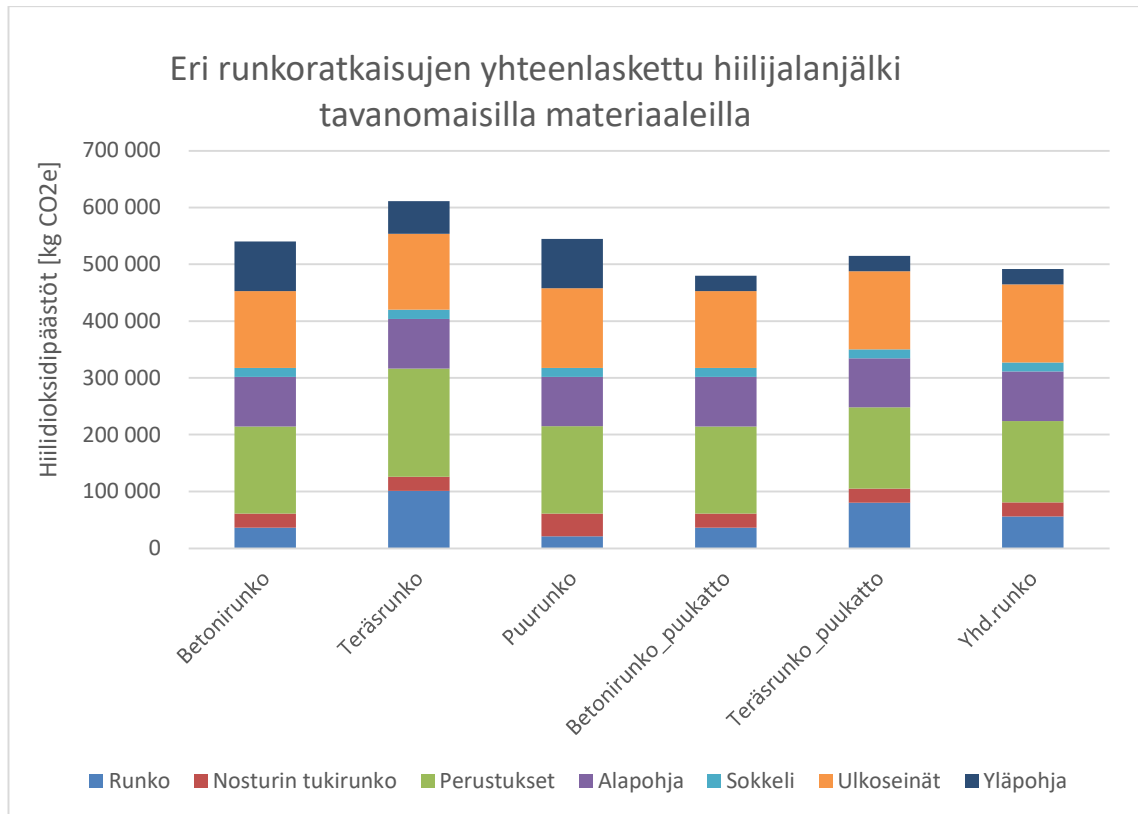
Rungon rakenneosista hiilijalanjäljen suhteen merkittävimpiä ovat kuvan 8 mukaisesti perustukset, ulkoseinät ja alapohja. Laskennan mukaan hiilijalanjäljet perustuksilla on noin 154 000 kg CO₂e, ulkoseinillä noin 135 000 kg CO₂e ja alapohjilla noin 87 000 kg CO₂e. Nämä kaikki ovat suurikokoisia rakenteita, mikä selittää niiden hiilijalanjäljen suuruuden. Tässä perustapauksen laskennassa esimerkiksi kaikki ulkoseinät ovat toteutettu samoilla sandwich-elementeillä ja niiden pieni ero hiilijalanjäljessä syntyy ainoastaan runkoratkaisun takia, ei materiaalivalintojen. Kuvan 8 perusteella voidaankin nähdä eri runkoratkaisujen merkitys rakenteiden hiilijalanjälkeen, ilman muiden materiaalivalintojen vaikutuksia.

Eri runkoratkaisuissa rakenneosien hiilijalanjälkisuuruudet eroavat yllättävän paljon toisistaan. Kun halutaan tutkia rakenneosien merkitystä koko hiilijalanjälkeen, on tarpeen tutkia tiettyä runkoratkaisua kerrallaan. Esimerkiksi puurunkoisen hallin rakenneosien hiilijalanjälkien suhteelliset osuudet ovat alla olevan kuvan 9 mukaiset. Rakennuksen perustukset ja ulkoseinät kattavat yhteensä jopa 50 % koko rakennuksen hiilijalanjäljestä. Ulkoseinien materiaalivalinta on siis erittäin merkittävä tekijä hiilijalanjäljen suuruudessa. Onneksi myös ulkoseinille löytyy monenlaisia materiaalivaihtoehtoja muun muassa sandwich-elementeistä ja näin se on suhteellisen helppo rakenne muutettavaksi hiilijalanjäljen pienentämismielessä.



Kuva 9: Puurunkoisen hallin hiilijalanjäljen muodostuminen.

Tavanomaisilla rakennusmateriaaleilla lasketut hiilijalanjäljet voidaan esittää myös eri runkoratkaisujen kautta, tämä on esitettyä kuvassa 10. Kuvasta nähdään, miten teräsrunkoisella hallilla on suurin hiilijalanjälki, noin 611 000 kg CO₂e, kun taas betonirunkoisella ja puukatoisella hallilla on pienin, noin 480 000 kg CO₂e. Näiden kahden runkoratkaisun suurin ero hiilijalanjäljessä syntyy sekä niiden rungosta ja perustuksista että yläpohjasta. Betonirunkoisella ja puukatoisella hallilla hiilijalanjälki on teräshalliin verrattuna 65 000 kg CO₂e pienempi rungosta, 37 000 kg CO₂e perustusten ja 30 000 kg CO₂e yläpohjan osalta. Kuvan perusteella nähdään myös, miten kaikkien runkoratkaisujen välillä suurimmat muutokset rakenneosatasalla tapahtuu rungolla ja yläpohjalla. Muut rakenteet pysyvät suurin piirtein samansuuruisina rungosta riippumatta.



Kuva 10: Eri runkoratkaisujen yhteenlaskettu hiilijalanjälki tavanomaisilla materiaaleilla.

Kuvasta 10 voidaan myös nähdä, miten paljon jo ainoastaan yläpohjan muutos vaikuttaa hiilijalanjälkeen, sekä kuinka eri runkojen yhdistely vaikuttaa tuloksiin. Laskennassa on otettu huomioon betoni- ja teräsrunkoinen halli puukatolla, sekä yhdistetty runkoratkaisu.

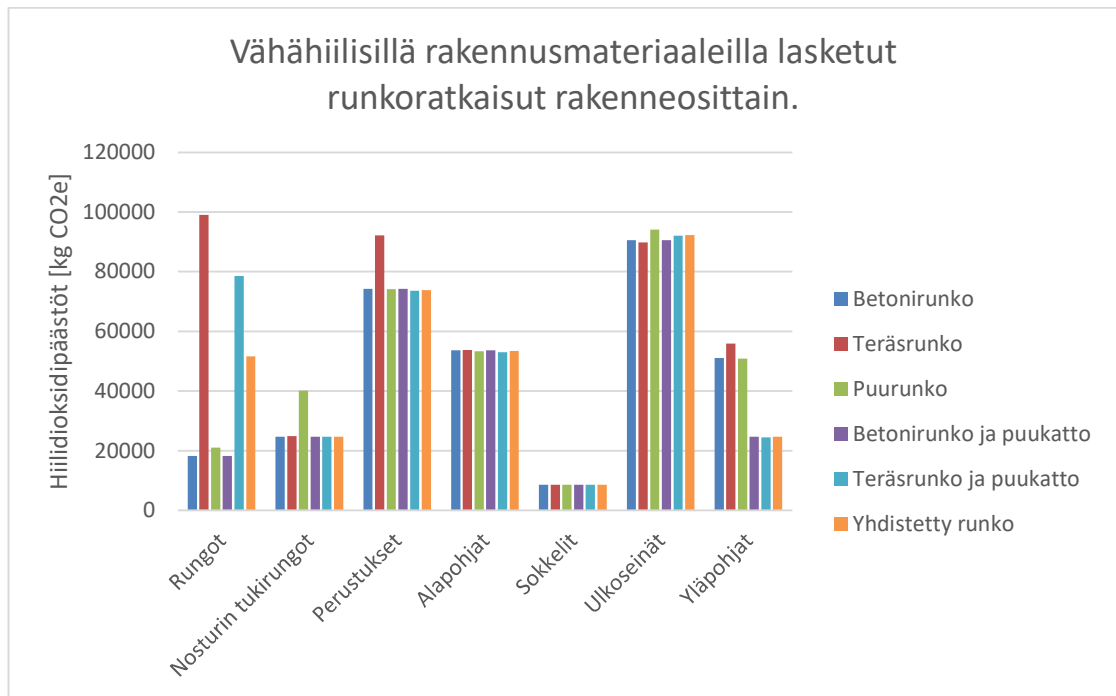
Kuvan 10 mukaan betonisen hallirakennuksen hiilijalanjälki on noin 540 000 kg CO₂e ja puukattoisena se on noin 480 000 kg CO₂e. Betonirunkoisen hallin hiilijalanjälki pienenee tällöin noin 60 000 kg CO₂e eli noin 11 % yläpohjan materiaalin muutoksella. Laskennassa betoninen ontelolaattayläpohja on vaihdettu puiseen kattoelementtiyläpohjaan. Teräksisellä runkoratkaisulla hiilijalanjälki on kuvan 10 mukaan 611 000 kg CO₂e ja puukattoisena noin 515 000 kg CO₂e. Hallin hiilijalanjälki pienenee tällöin noin 96 000 kg CO₂e eli 16 %. Laskennassa poimulevy-yläpohja on vaihdettu puiseen kattoelementtiyläpohjaan. Yhdistetyssä rungossa on taas rungossa käytössä teräsristikot, että teräs-betonipilarit ja yläpohjana puinen kattoelementtiyläpohja. Sen hiilijalanjälki on 492 000 kg CO₂e. Eli se on hieman enemmän kuin betonirunkoisella ja puukattoisella hallilla, johtuen juuri teräksisistä kattoristikoista. Tästä voidaan päätellä, että jo yhden rakenteen materiaalin muutos vaikuttaa huomattavasti rakennuksen kokonaishiilijalanjälkeen.

4.2 Hiilijalanjälki vähähiilisillä rakennusmateriaaleilla

Laskennan toisessa vaiheessa tutkitaan vähähiisempiä rakennusmateriaaleja. Monille rakennusmateriaaleille löytyy nykyään myös uusia vähähiisempiä vaihtoehtoja, joissa pyrkimyksenä on ollut löytää uusi ratkaisu samanlaiselle tuotteelle, pienemmällä hiilijalanjäljellä. Tutkimuksessa lasketaan edellisen luvun mukaisesti hiilijalanjäljet eri rakenteille (kuva 11) ja runkoratkaisuille (kuva 12), mutta tällä kertaa rakenteissa käytetään mahdollisimman paljon vähähiilisiä rakennusmateriaaleja.

Tutkimuksessa normaaleja materiaaleja on korvattu vähähiilisillä materiaaleilla lähtökohteisesti jokaisessa rakenneosassa. Vähähiilisenä materiaalina normaali betoni on korvattu vähähiilisellä vihreällä betonilla, tarkemmin Ruduksen vihreällä betonilla seuraavissa lujuuksissa C25/30, C30/37 ja C40/50. Alapohjassa maanvaraisen betonilaatan alla käytetään vähähiilisenä eristevaihtoehtona Finnfoamin XPS-eristettä Finnfoamin PIR-eristeen sijaan. Yläpohjassa ja ulkoseinärakenteissa, sokkielementeissä ja teräsrankarungossa, käytetään eristeenä vähähiilistä Paroc:n Natura Lana -kivivillaeristettä. Lisäksi ontelolaattayläpohjassa käytetään vähähiilisenä vaihtoehtona Parman vähähiilistä ontelolaattaa. Ulkoseinissä pelti-villa-pelti elementtinä käytetään vähähiilisenä vaihtoehtona Ruukin SP2E F-PIR -sandwichpaneelia.

Kuvassa 11 nähdään vähähiilisten materiaalivalintojen mukaan lasketut hiilijalanjäljet eri runkoratkaisuille, rakenneosittain lajiteltuina. Kuvasta 11 näkyy hieman paremmin materiaalien vaikutus rakenteiden hiilijalanjälkeen, kuin tavanomaisten materiaalien kohdalla kuvassa 9. Rakenneosista runkojen hiilijalanjäljet nousevat selvästi esille, niissä olevan suuren vaihtelevuuden takia. Rungoista teräsrungolla on selvästi suurin hiilijalanjälki, jopa 99 000 kg CO₂e, kun taas vähähiilisellä vihreästä betonista tehdyllä betonirungolla on pienin hiilijalanjälki, noin 18 000 kg CO₂e. Teräsrungolla on siis yli viisinkertainen hiilijalanjälki kuin betonirungolla. Eli betonirungon hiilijalanjälki on noin 18 % teräsrungon hiilijalanjäljestä. Tämä tulos betonin ja teräksen välillä on kuitenkin ilmiselvä, johtuen teräksen erityisen korkeista GWP-arvoista, joka syntyvät teräksen valmistuksesta. Betonin hiilijalanjälki on myös yleensä suhteellisen suuri, sen sisältämän sementin valmistuksen takia, mutta vähähiilisillä betoneilla hiilijalanjälki on kuitenkin saatu laskettua tehokkaasti. Betonirungon hiilijalanjälki on laskenut vähähiilisen materiaalin myötä tavanomaisesta noin 50 %. Puurungolla hiilijalanjälki on 21 000 kg CO₂e. Sen ero betonirungon arvoon on suhteellisen pieni ja selittyy materiaalien hiilijalanjäljellä. Yllättävää on, että betonirungossa betonia on kuutioltaan jopa enemmän kuin puurungossa liimapuuta. Ero näiden hiilijalanjäljissä on kuitenkin todella pieni.



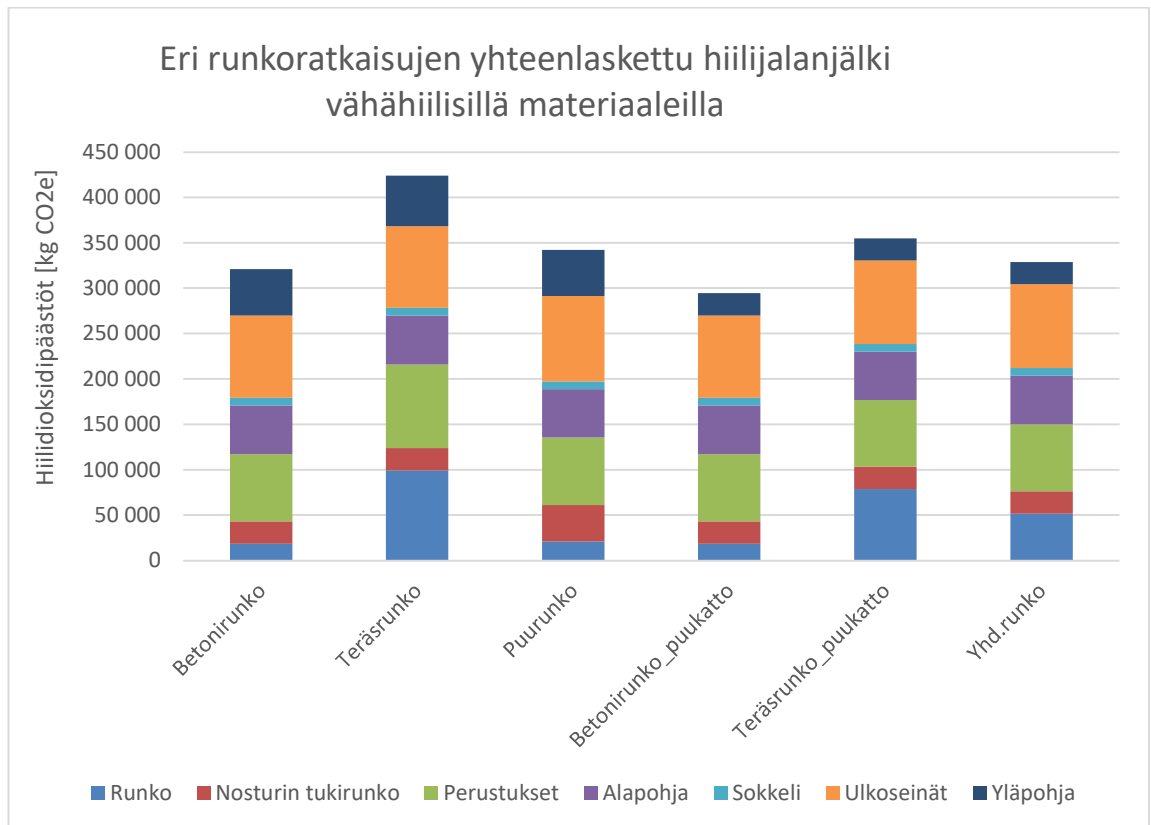
Kuva 11: Vähähiilisillä rakennusmateriaaleilla lasketut runkoratkaisut rakenneosittain.

Vähähiilisillä rakenteilla rakenneosien merkitys kokonaishiilijalanjälkeen on säilynyt suhteellisen samana, kuin perustapauksessa. Selvänä erona on ulkoseinien osuus, joka on vähähiilisiä rakennusmateriaaleja käytettäessä kasvanut. Merkittävimmät rakenteet hiilijalanjäljen suhteen ovat ulkoseinät, perustukset ja alapohjat. Rungon merkittävyys riippuu paljon sen materiaalista, kuin myös yläpohjan.

Vähähiilisiä rakenteita verratessa perustapauksen rakenteisiin nähdään, miten hiilijalanjälki on pienentynyt huomattavasti perustusten, alapohjien ja ulkoseinien osalta. Karkeasti laskettuna kaikkien hallien perustusten hiilijalanjälki on pienentynyt noin 50 %, alapohjien noin 40 % ja ulkoseinien noin 30 %. Hiilijalanjäljen laskeminen näin tasaisesti, voi johtua siitä, että samoja materiaaleja käytetään jokaisessa runkoratkaisussa, vaikkakin määrät vaihtelevat hieman eri rakenteissa.

Kun vähähiilisten rakenteiden tulokset järjestetään runkoratkaisun perusteella, saadaan kuvan 12 mukaiset pystydiagrammit. Kuvasta nähdään, kuinka hiilijalanjäljet jakautuvat jokaiselle runkoratkaisulle. Betonirungossa ulkoseinät kasvattavat hiilijalanjälkeä eniten, sitten perustukset ja alapohja. Teräsrungolla vastaavasti arvoa kasvattavat runko, perustukset ja ulkoseinät. Puurungolla tilanne on vastaava kuin betonirungolla. Puukattoratkaisuilla ja yhdistetyllä rungolla tilanne muuttuu vain hieman.

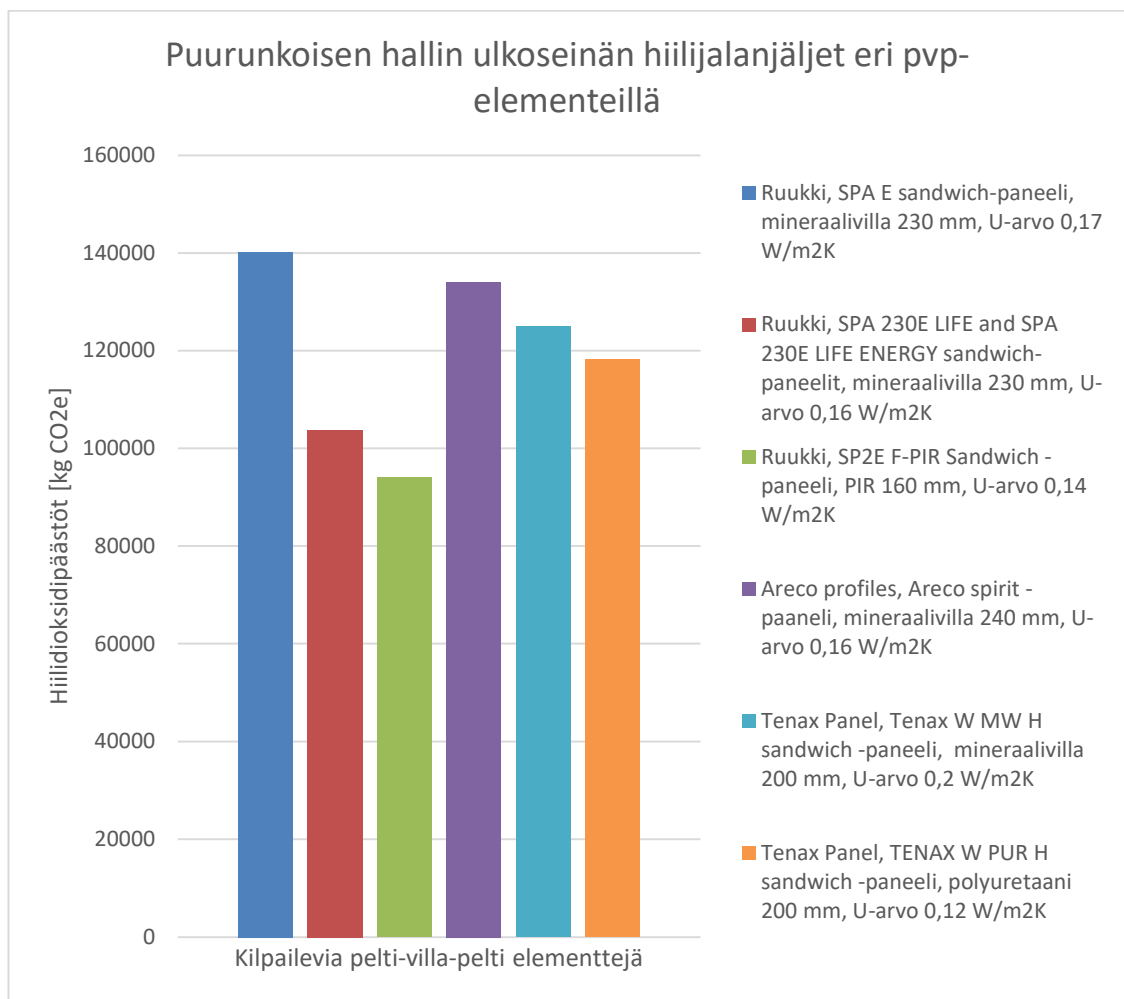
Ulkoseinät olivat tavanomaisilla materiaaleilla laskettaessa yksiä merkittävimpiä rakeneosia hiilijalanjäljen suhteen ja tilanne on kuvan 12 mukaan säilynyt suhteellisen samana. Vähähiilisillä materiaaleilla laskettaessa ulkoseinät ovat yksiä merkittävimpiä rakenteita jokaisessa runkoratkaisussa. Teräsrunkoisessa hallissa tilanne on hieman tasisempi, ulkoseinät ovat suuruusluokaltaan yhtä merkittäviä kuin runko tai perustukset. Ulkoseinän mahdollisia eri pelti-villa-pelti-elementtejä tutkitaan tarkemmin kuvassa 13.



Kuva 12: Eri runkoratkaisujen yhteenlaskettu hiilijalanjälki vähähiilisillä materiaaleilla.

Kun kuvaa 12 verrataan perustapauksen vastaavaan kuvaan, huomataan, miten eri runkoratkaisujen hiilijalanjälkien suuruusjärjestys muuttuu. Vähähiilisissä runkoratkaisuissa pienin hiilijalanjälki on betonirunkoisella ja puukattoisella hallilla, sen hiilijalanjälki on 295 000 kg CO₂e. Sen jälkeen hiilijalanjäljet pienimmästä suurempaan ovat runkoratkaisut: betonirunko noin 321 000 kg CO₂e, yhdistelmärunko noin 329 000 kg CO₂e, puurunko noin 342 000 kg CO₂e, teräsrunko puukatolla noin 355 000 kg CO₂e ja viimeisenä teräsrunko noin 424 000 kg CO₂e. Perustapauksessa tavanomaisilla materiaaleilla järjestys on erilainen kuin vähähiilisillä laskettaessa, vain vähähiilisin runkoratkaisu ja suurimman hiilijalanjäljen omaava runkoratkaisu ovat samoja kummassakin laskennassa.

Tutkitaan tarkemmin puurunkoista hallia ja sen ulkoseinän hiilijalanjäljen osuutta rakennuksen koko hiilijalanjälkeen. Puurunkoisella hallirakennuksella on kuvassa 12 ulkoseinänä pelti-villa-pelti-elementti, Ruukin PIR-eristäinen sandwich-paneeli. Tämä pvp-elementti on 160 mm paksu ja U-arvoltaan 0,14 (Ruukki, Sandwich paneelit - PIR-ytimellä, ympäristöseloste 2020). Tätä elementtiä käytettäessä puurunkoiselle hallille tuli hiilijalanjäljeksi noin 342 000 kg CO₂e. Tutkitaan seuraavaksi, millaisia arvoja vähähiiliselle puurunkoiselle hallille saadaan eri pvp-elementeillä. Tulokset näkyvät alla olevassa kuvassa, kuva 13.



Kuva 13: Puurunkoisen hallin ulkoseinän hiilijalanjäljet eri pvp-elementeillä.

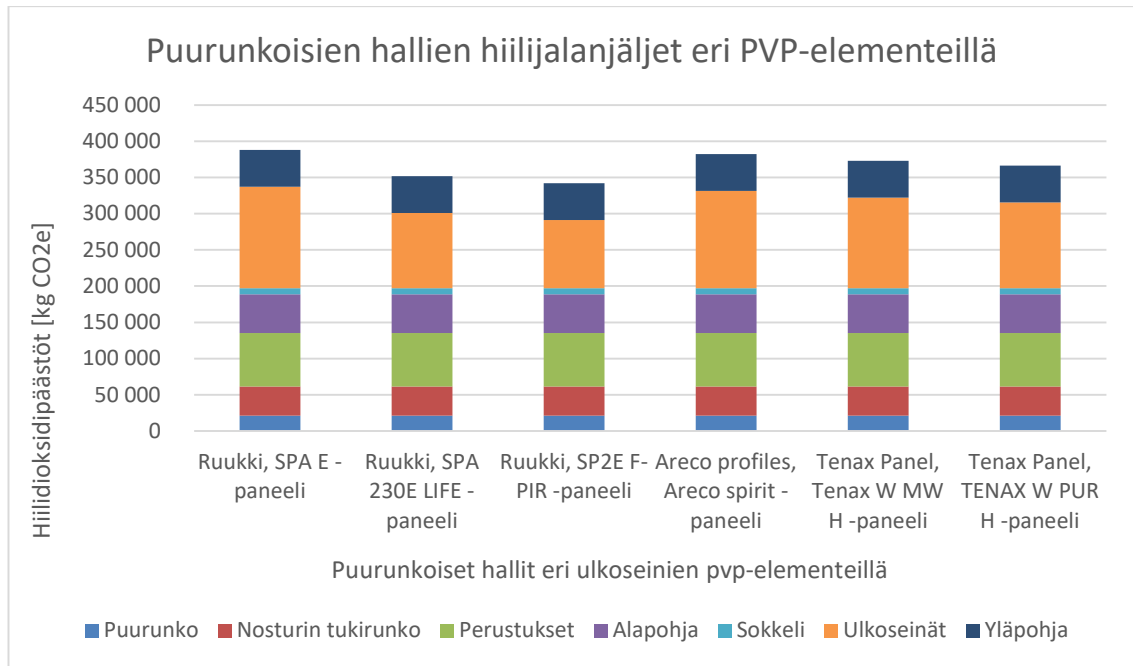
Vertailussa on perustapauksessa ollut niin sanottu tavanomainen pvp-elementti, Ruukin SPA E sandwich-paneeli ja lisäksi vähähiilisessä tilanteessa käytetty Ruukin SP2E F-PIR sandwich-paneeli. Vertailuun on otettu edellisten lisäksi neljä muuta pvp-elementtiä: Ruukin SPA 230E Life sandwich-paneeli, Tenax Panel -valmistajalta Tenax W MW H sandwich-paneeli ja Tenax W PUR H sandwich-paneeli, sekä Areco profiles -valmista-

jalta Areco spirit sandwich -paneeli. Näistä mineraalivillaeristeisiä elementtejä ovat Ruukin SPA E ja SPA 230E Life -paneelit, Areco profiles:in Areco spirit -paneeli ja Tenax Panel:in Tenax W MW H -paneeli. Näiden elementtien paksuudet ja u-arvot vaihtelevat hieman tuotteen mukaan, mutta ne kaikki ovat kuitenkin mahdollisia elementtejä hallin ulkoseinään. Tarkemmin elementtien paksuudet ja u-arvot näkyvät kuvassa 13. Lisäksi vertailussa on PIR ja PUR eristeiset sandwich-paneelit. PIR-eristeinen paneeli on Ruukin SP2E F-PIR -paneeli. PUR-eristeinen paneeli on Tenax Panel:in TENAX W PUR H -paneeli. Nämä paneelit ovat u-arvoltaan huomattavasti parempia kuin toiset paneelit, ja tämän takia myös niiden paksuudet ovat huomattavasti pienempiä.

Kuvan 13 mukaan voidaan todeta, että Ruukin SP2E F-PIR sandwich -paneeli on vähähiilisin vaihtoehto puurunkoiselle hallirakennukselle. Kyseistä paneelia käytettäessä hallin ulkoseinän hiilijalanjälki on yhteensä noin 94 000 kg CO₂e. Ero tavanomaisen vaihtoehdon ja Ruukin SPA E sandwich-paneelin välillä on merkittävä. Ruukin SPA E sandwich-paneelilla ulkoseinän hiilijalanjälki on noin 140 000 kg CO₂e. Toiseksi paras vaihtoehto kuvan mukaisesti on Ruukin SPA 230E Life sandwich-paneeli, jota käytettäessä ulkoseinän hiilijalanjälki on noin 104 000 kg CO₂e.

Tenax Panel:in Tenax W PUR H -elementti jää vertailussa keskiarvoiseksi vaihtoehdoksi hiilijalanjäljen suhteen. Sitä käytettäessä ulkoseinän hiilijalanjälki on 118 000 kg CO₂e. Sitä käytettäessä seinän u-arvo on kuitenkin huomattavasti parempi kuin muissa vaihtoehdoissa, ja se on myös parempi kuin normaali u-arvon vaatimustaso. Tämän paneelin u-arvo on 0,12 W/m²K. Normaalisti ulkoseinän u-arvo vaatimus lämpöiselle rakennukselle on 0,17 W/m²K, (Ympäristöministeriö 1010/2017, §24).

Kuvan 13 vertailusta nähdään, miten mineraalivillaisten sandwich-paneelien välillä on tuotteiden tasolla suurta vaihtelua. Hiilijalanjälki ei suoraan synny materiaalivalinnoista vaan myös valmistajalla on ilmeisesti merkitystä. Vähähiilisin sandwich-paneeli on, tässä vertailussa, PIR-eristeinen paneeli. Seuraavaksi paras on mineraalivillainen sandwich-paneeli ja eniten päästöjä aiheuttava vaihtoehto on myös mineraalivillainen tuote. PUR-eristeinen paneeli on myös ominaisuuksien suhteen hyvä valinta, jos tarvitaan hyvää lämmöneristyskykyä. eli pientä U-arvoa.

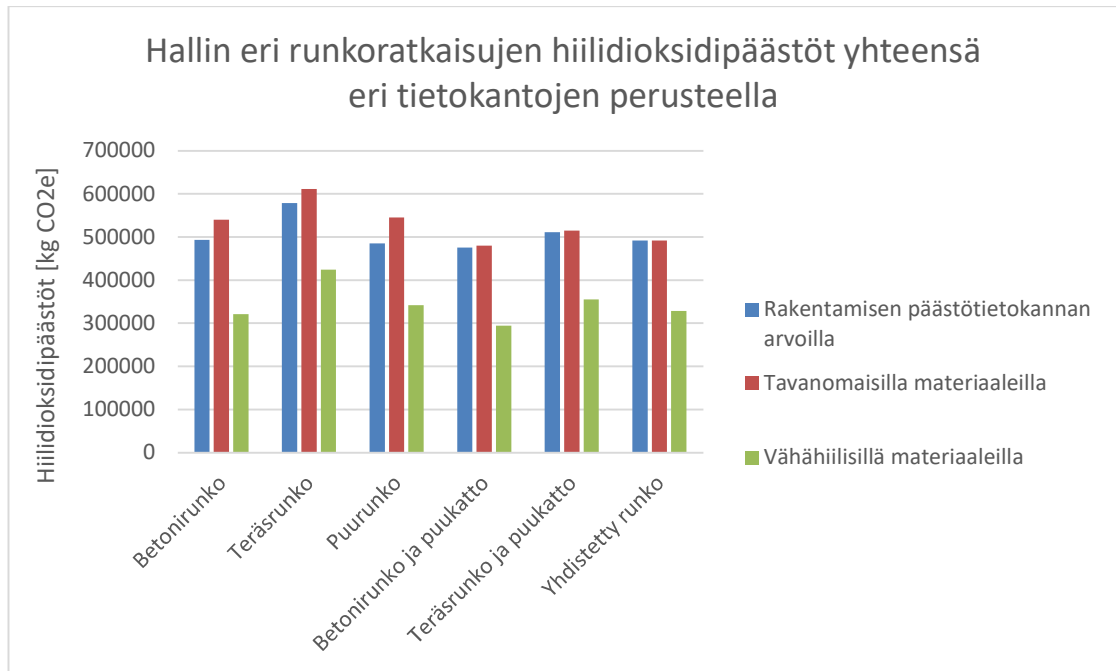


Kuva 14: Puurunkoisten hallien hiilijalanjäljet eri pvp-elementeillä.

Kuvasta 14 nähdään, minkälainen on eri pvp-elementtien hiilijalanjäljen merkitys puurunkoisen hallin kokonaishiilijalanjälkeen nähden. Ulkoseinien osuus rakennuksen hiilijalanjäljessä on suurin kaikista rakenneosista. PIR-eristeisen pvp-elementin kohdalla ulkoseinän ja perustusten välinen hiilijalanjälkiero on tosin muihin tapauksiin verraten pieni. Ero on vain 20 000 kg CO₂e.

4.3 Käytetyn tietokannan vaikutus tuloksiin ja tulosten vertailu

Kun tarkastellaan eri tietokantojen vaikutusta tuloksiin, saadaan kuvan 15 mukaiset arvot. Kuvasta nähdään, miten suuri vaikutus eri tietokannoilla on hiilijalanjälkeen. Vertailussa on esitettyä eri runkoratkaisujen kokonaishiilijalanjäljet, eri tietojen kautta lasketuna. Rakennusmateriaalien GWP-arvojen saamiseksi on vertailun vuoksi käytetty niin valmistajien sivuja, kuin Rakennustietosäätiön RTS EPD-ympäristöselosteiden hakua ja Rakentamisen päästötietokannan (CO₂data.fi) arvoja. Tavanomaisten ja vähähiilisten rakennusmateriaalien tietoja on otettu tuotteiden EPD-ympäristöselosteista, valmistajien kuin Rakennustiedon RTS EPD-sivuston hakupalvelun kautta. Rakentamisen päästötietokannasta on otettu vastaavia tavanomaisia rakennusmateriaaleja niissä puitteissa, mitä tietokannassa on tarjolla. Tulokset eri runkoratkaisujen hiilijalanjäljille näkyvät alla olevassa kuvassa 15.



Kuva 15: Hallin eri runkoratkaisujen hiilijalanjäljet yhteensä eri tietokantojen perusteella.

Kuvasta 15 nähdään eri runkojen hiilijalanjäljet tavanomaisilla ja vähähiilisillä materiaalien arvoilla laskettuna, sekä rakentamisen päästötietokannan keskiarvo tiedoilla laskettuna. Vähähiiliset materiaalit on esitetty kappaleessa 4.2. Betonirungolle vähähiilisillä materiaaleilla saadaan 40 % pienempi ja päästötietokannan arvoilla 9 % pienempi hiilijalanjälki, kuin mitä tavanomaisilla materiaaleilla hiilijalanjälki on. Teräsrunkolle saadaan vähähiilisillä materiaaleilla laskettuna 31 % pienempi ja päästötietokannan arvoilla 5,4 % pienempi hiilijalanjälki kuin tavanomaisilla materiaaleilla. Vastaavasti puurunkoisella hallilla vähähiilinen hiilijalanjälki on 37 % pienempi ja päästötietokannalla 11 %. Betonirunkoisella ja puukattoisella hallilla vähähiilinen ratkaisu on 39 % pienempi ja päästötietokannan arvoilla 1 % pienempi. Teräsrunkoisella puukattoisella hallilla vähähiilinen ratkaisu on 31 % pienempi ja päästötietokannan arvoilla 0,7 % pienempi. Yhdistetyllä runkoratkaisulla hallin vähähiilisillä materiaaleilla saadaan 34 % pienempi hiilijalanjälki ja päästötietokannan arvoilla saadaan prosentin tarkkuudella yhtä suuri kuin tavanomaisilla.

Kuvasta 15 nähdään selvästi tavanomaisten ja vähähiilisten rakennusmateriaalien välillä oleva ero hiilijalanjäljessä. Rakentamisen päästötietokannan kautta lasketut tulokset eivät jää tavanomaisten ja vähähiilisten arvojen väliin, vaan ovat pääsääntöisesti melkein yhtä korkeita kuin tavanomaisille materiaaleille lasketut arvot. Tämä selittyy, sillä, että Rakentamisen päästötietokannan tarjoamat GWP-arvot ovat rakennustuotteiden kes-

kiarvoja. Tällä hetkellä vähähiilisiä rakennusmateriaaleja on kuitenkin vähemmän saatavilla kuin tavanomaisia materiaaleja, ja näin rakennustuotteiden GWP-arvojen keskiarvo on tavanomaisten materiaalien arvojen läheisyydessä.

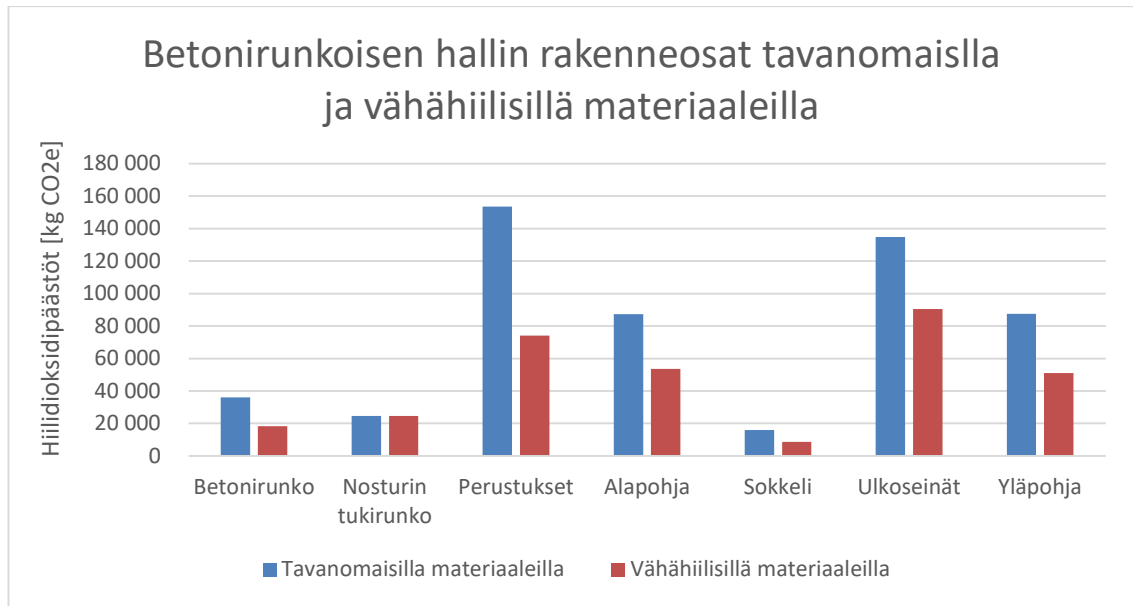
Kuvasta 15 nähdään, kuinka tärkeää on käyttää yhtenäistä tietokantaa. Tavanomaisten materiaalien tulokset eivät vastaa Rakentamisen päästötietokannan arvoja, ja vähähiilisten materiaalien EPD-tiedot ovat jo todella kaukana rakentamisen päästötietokannan keskiarvotiedoista. On siis huomattava, että tulokset vääristyvät huomattavasti, jos tuotteiden EPD-tietoja sekoitetaan keskiarvotietoihin. Tässä tutkimuksessa rakentamisen päästötietokannasta on käytetty tyyppi-arvoja, jolloin konservatiivista kerrointa ei oteta huomioon. Tällöin materiaalien arvot ovat hieman enemmän verrattavissa. On siis huomioitava, että konservatiivisia arvoja käytettäessä erot olisivat vielä suurempia.

Kuvasta 15 tulee myös ilmi, miten eri tietokantojen käyttäminen vaikuttaa rakennuksen hiilijalanjälkeen eroavissa määrin, riippuen runkoratkaisun materiaalista. Yhdistetyllä rungolla tavanomaisten materiaalien ja päästötietokannan kautta lasketut hiilijalanjäljet eivät juuri eroa toisistaan, kun taas puu- ja betonirunkoisissa ratkaisuissa erot ovat huomattavat. Tämän syynä voi olla eri rakennusmateriaalien erilainen tarjonta. Betonista on saatavilla jo monia vähähiilisiä tuotteita ja tämä aiheuttaa suurempaa eroa päästötietokannan keskiarvon ja tavanomaisten materiaalien arvon välille.

Vertaillaan tarkemmin betonirunkoisen hallin hiilijalanjälkiä tavanomaisilla ja vähähiilisillä materiaaleilla, valmistajien EPD-tietojen perusteella. Laskennassa käytetyt vähähiiliset rakennustuotteet ovat betonirunkoisessa hallirakennuksessa; Ruduksen vihreä betoni, Finnfoamin XPS-eriste, Paroc:n Natura Lana -kivivillaeriste, Ruukin SP2E F-PIR -sandwichpaneeli ja Parman vähähiilinen ontelolaatta.

Kuvan 15 perusteella voidaan vertailla tavanomaisista ja vähähiilisistä materiaaleista koostuvia halleja. Kuvan 15 mukaan betonirunkoisen hallin hiilidioksidipäästöt elinkaaren ajalta ovat tavanomaisilla materiaaleilla yhteensä 540 000 kg CO₂e ja vähähiilisillä materiaaleilla vastaavasti 321 000 kg CO₂e. Tämä tarkoittaa, että vähähiilisillä materiaaleilla rakennettaessa rakennuksen hiilijalanjälki on 60 % tavanomaisten materiaalien hallin hiilijalanjäljestä. Vähähiilisillä valinnoilla saavutetaan tämän mukaan siis merkittäviä vähennyksiä hiilidioksidipäästöissä.

Kun betonirunkoisen hallin hiilijalanjäljet esitetään rakenneosittain, niin tavanomaisilla kuin vähähiilisillä materiaaleilla, saadaan kuvan 16 mukaiset pystydiagrammit.



Kuva 16: Betonirunkoisen hallin rakenneosat tavanomaisilla ja vähähiilisillä materiaaleilla.

Kuvan 16 mukaan merkittävin muutos betonirunkoisen hallin hiilijalanjälkeen saadaan perustuksien materiaalmuutoksella, kun tavanomaisen betonin sijasta käytetään vähähiilistä betonia. Tämä muutos on pienentänyt perustuksien hiilijalanjälkeä 52 % pienemmäksi.

Ulkoseinien hiilijalanjäljissä tapahtuu myös erittäin suuri muutos kuvassa 16. Tavanomaisessa tapauksessa ulkoseinät muodostuvat Ruukin SPA E -sandwichpaneelista, jolloin ulkoseinien hiilijalanjälki on noin 137 000 kg CO₂e. Vähähiilisessä tapauksessa ulkoseinät ovat Ruukin SP2E F-PIR -sandwichpaneelia, joiden hiilijalanjälki on pyöristettynä 91 000 kg CO₂e. Tällöin ulkoseinien sandwich-elementtien vaihdos on laskenut hiilijalanjälkeä noin 34 %.

Yläpohjan kohdalla hiilijalanjälki on materiaalmuutosten myötä laskenut 42 %. Tähän on vaikuttanut ontelolaattojen ja eristeen vaihdos. Tavanomaisilla materiaaleilla yläpohjassa ontelolaattoina on käytössä Parman ontelolaatta ja eristeenä Paroc:n eXtra kivivilaeriste. Näillä yläpohjan hiilijalanjälki on 88 000 kg CO₂e. Vähähiilisillä materiaaleilla ontelolaattoina on Parman vähähiilinen ontelolaatta ja eristeenä Paroc:n Natura Lana -kivivilaeriste. Tällöin hiilijalanjälki on noin 51 000 kg CO₂e. Ontelolaatan vaihdos vähähiiliseen ontelolaattaan tekee merkittävimmän muutoksen yläpohjan hiilijalanjälkeen. Laskujen mukaan ontelolaatat aiheuttavat noin 70–80 % yläpohjanhiilijalanjäljestä. Ainstaan ontelolaattojen vaihdos pienentää yläpohjan hiilijalanjälkeä jopa 40 %. Pelkän eristeen muutos vähentää hiilijalanjälkeä 1,5 %.

Alapohjan osalta hiilijalanjälki pienenee materiaalmuutosten myötä 39 %. Alapohjassa materiaalmuutokset tapahtuvat betonille sekä eristeelle. Tässä rakenteessa betonin ja eristeen merkitykset hiilijalanjälkeen ovat melkein yhtä suuret, riippuen materiaalivalinnoista. Alapohjassa on eristeenä käytössä niin sanottuna tavanomaisena materiaalina Finnfoamin FF-PIR-eriste ja vähähiillisenä materiaalina Finnfoamin XPS-eriste. PIR-eristeen vaihtaminen XPS-eristeeseen pienentää hiilijalanjälkeä 39 %, kuten myös betonin vaihtaminen. Hiilijalanjäljeltään pienille rakenteille, betonirungolle ja sokkelille, saadaan määrällisesti vain pieniä muutoksia hiilijalanjälkeen, vaikkakin suhteellisesti katsottuna ne ovat suuria. Betonirungon päästöt pienenevät 40 % ja sokkelin 46 %. Nosturin tukirungon hiilijalanjälki ei muutu, koska se tehdään teräksestä.

Vaikka nämä tulokset ovat vain betonirunkoiselle hallirakennukselle, myös muille runkoratkaisuille vähähiillisillä materiaaleilla saadaan merkittävää hiilijalanjäljen pienentymistä. Tämä näkyy kuvasta 15. Pienentyminen onkin suhteellisen samansuuruista kaikissa runkoratkaisuissa. Suurta eroa ei synny rungon materiaalin perusteella. Betonirungolla hiilijalanjäljen pienentyminen on hieman suurempaa kuin muilla, koska laskelmissa betonille on tavanomaisesta materiaalista vähähiillinen materiaali, toisin kuin puulle tai teräkselle, joilla se pysyy samana materiaalina.

5. TULEVAISUUDEN NÄKYMÄT VIHREILLE MATERIAALEILLE

Vähähiilisten rakennusmateriaalien tulevaisuuden näkymiä voidaan tällä hetkellä vain arvioida. Tämän tutkimuksen tuloksien perusteella voidaan pohtia, kuinka hyviä markkinoilla nyt olevat vähähiiliset rakennusmateriaalit ovat verrattuna tavanomaisiin rakennusmateriaaleihin, sekä kuinka hyvin ne vastaavat yritysten vähähiilisyystavoitteisiin.

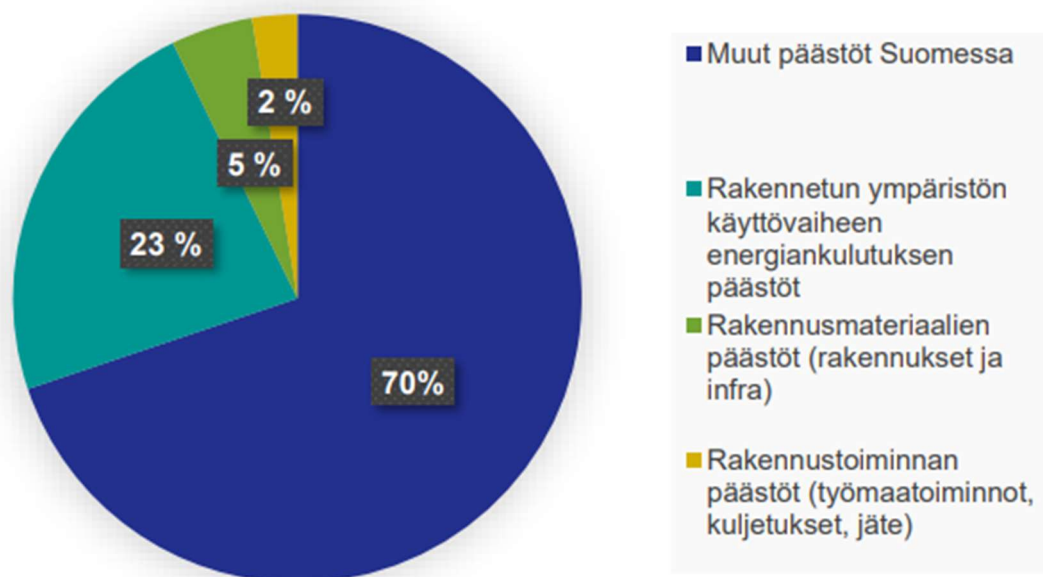
Laskelmissa on käytetty erilaisia tällä hetkellä markkinoilla olevia vähähiilisiä materiaaleja. Käytetyt vähähiiliset materiaalit ovat Ruduksen vihreä betoni lujuuksissa C25/30, C30/37 ja C40/50, Finnfoamin XPS-eriste, Paroc:n Natura Lana -kivivillaeriste, Ruukin SP2E F-PIR -sandwichpaneeli ja Parman vähähiilinen ontelolaatta. Vähähiilisiä vastaavat tavanomaiset materiaalit ovat laskennassa normaali betoni (Bionovan EPD-tietojen mukaan), Finnfoamin PIR-eriste, Parocin eXtra-mineraalivillaeriste, Ruukin SPA E - sandwichpaneeli ja Parman yleinen ontelolaatta. Jos näitä vähähiilisiä ja tavanomaisia materiaaleja verrataan keskenään, niin hiilijalanjälki pienenee tavanomaisen materiaalin vaihtuessa vähähiiliseen seuraavasti: betonilla 50 %, eristelevyllä 39 %, mineraalivillaeristeellä 51 %, sandwichpaneelilla 49 % ja ontelolaatalla 49 %. Nämä vähähiiliset rakennustuotteet ovat selvästi vähähiilisempiä kuin tavanomaiset vastaavat tuotteet. Se, kuinka paljon niillä pystytään todellisuudessa pienentämään rakennuksen koko hiilijalanjälkeä, tulee ilmi vasta kyseisen rakennuksen hiilijalanjäljen laskennassa.

Tutkimuksen tuloksien mukaan vähähiilisillä rakennusmateriaaleilla saadaan laskettua hallirakennuksen hiilijalanjälkeä, riippuen runkoratkaisusta, noin 31–40 % prosenttia. Tulokset tulevat ilmi luvussa 4.2.3 ja kuvasta 15. Suurin muutos saadaan aikaan betonirunkoiselle hallille, jonka hiilijalanjälki pienenee 40 %. Muilla rungoilla hiilijalanjäljen pienentyminen on välillä 31–37 %. Vähähiilisin halli syntyy betonirunkoisella ja puukattoisella runkoratkaisulla, jolloin hallin hiilijalanjälki on noin 295 000 kg CO₂e. Vähähiilisillä materiaaleilla on saatu tämän rakenneratkaisun kohdalla vähennettyä 39 % hiilidioksidipäästöjä perustapaukseen verrattuna. Onko tämä kuitenkin riittävä hiilidioksidipäästöjen vähennys, otettaessa huomioon erilaiset ympäristötavoitteet?

Ympäristöministeriön Hiilineutraali Suomi 2035 -sivuston mukaan hallitusohjelman (2019) tavoite on, että Suomi on hiilineutraali vuoden 2035 mennessä ja olla samalla

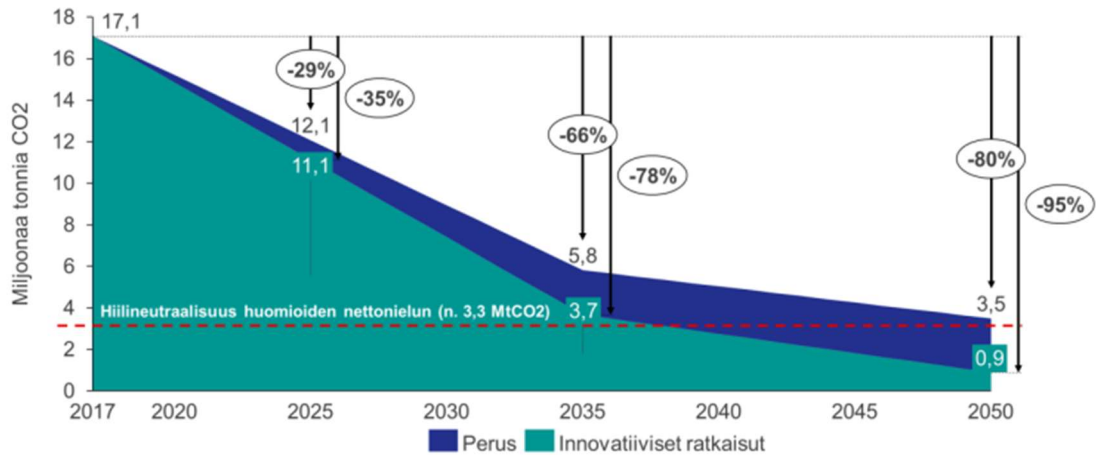
ensimmäinen fossiilivapaa hyvinvointiyhteiskunta (Ympäristöministeriö *n.d. a*). Koska rakentaminen ja rakennukset tuottavat noin kolmanneksi Suomen kasvihuonepäästöistä, niin myös rakennussektorin päästöjä olisi vähennettävä, jotta Suomi pystyisi saavuttamaan kansalliset ja kansainväliset ilmastotavoitteensa. Tämä tarkoittaa rakennusten käyttöaikaisen energiakulutuksen seurannan lisäksi myös rakennuksen koko elinkaaren hiilijalanjäljen seuranta. (Ympäristöministeriö *n.d. b*) Ministeriön tavoitteena on, että rakennuksen elinkaaren aikaista hiilijalanjälkeä tullaan ohjaamaan lainsäädännöllä 2020-luvun puoliväliin mennessä. Tätä varten ympäristöministeriö teki selvityksen Vähähiilisen rakentamisen tiekartasta ja sen pohjalta julkaistiin kolmivaiheinen tiekartta rakennuksen elinkaaren CO₂-päästöjen ohjaukseen, johon tulisi siirtyä vuoteen 2025 mennessä. (Ympäristöministeriö *n.d. c*) Tällä hetkellä ollaan 2. vaiheessa, jossa laaditaan ohjausjärjestelmää, eikä rakennuskannan päästötietoja vielä seurata, myöskään niiden raja-arvoja ei vielä ole. Eli suoranaista vastausta, mikä on oikean suuruinen hiilijalanjälki esimerkiksi hallirakennukselle, ei vielä ole.

Suomen hiilineutraalius vuoteen 2035 mennessä on kaiken kaikkiaan suuri tavoite. Rakennusteollisuuden teettämän Vähähiilinen rakennusteollisuus 2035 Osa 4. -raportin mukaan Suomen kasvihuonepäästöt olivat vuonna 2018 yhteensä 565,5 miljoonaa tonnia CO₂e. Siitä rakennusmateriaalien päästöt, sekä rakennukset ja infra huomioiden, on noin 5 %:ia. Tilanne näkyy kuvassa 17. Rakennusmateriaalien hiilidioksidipäästöjen vaikutus Suomen hiilineutraaliustavoitteeseen on kuvan 17 mukaan suhteellisen pieni. (Raivio *et al.* 2020, s. 9)



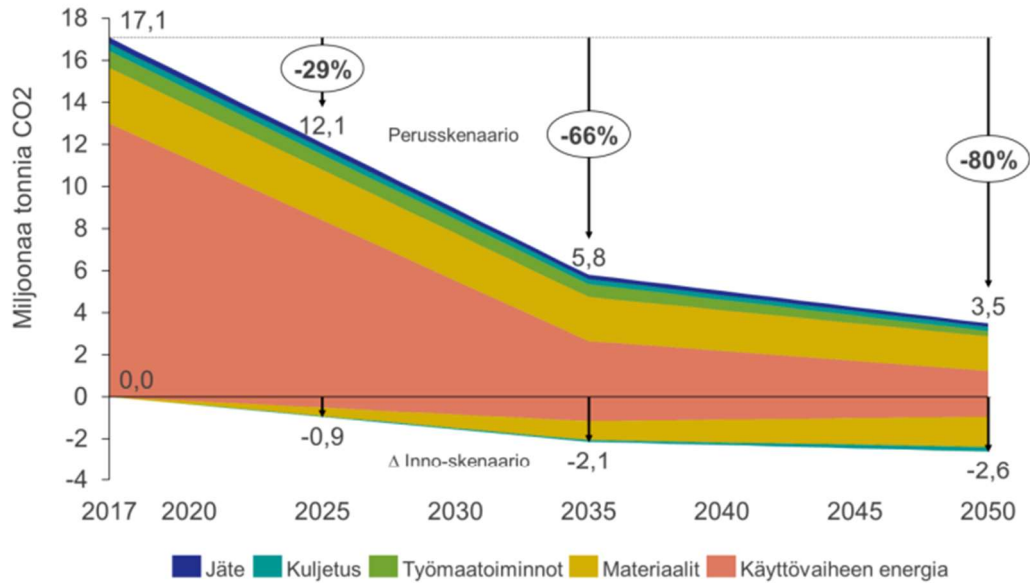
Kuva 17: Rakennetun ympäristön elinkaaren hiilijalanjäljen osuus Suomen päästöistä. (Raivio *et al.* 2020, s. 9)

Rakennusteollisuus (2020) on kyseisessä raportissa myös arvioinut ympäristötavoitteiden mahdollisia vaihtoehtoisia skenaarioita, joilla Suomen ympäristötavoitteet voitaisiin saavuttaa. Kuvassa 18 näkyy raportin perus- ja innovatiiviset ratkaisut -skenaarioiden kehittyminen, eli niiden mukaan laskettujen hiilidioksidipäästöjen vähentyminen vuosien 2017 ja 2050 aikana.



Kuva 18: Rakennusteollisuuden ja rakennetun ympäristön hiilijalanjäljen kehittyminen 2017–2050 perus- ja innovatiiviset ratkaisut -skenaarioissa. (Raivio *et al.* 2020, s. 24)

Kuvan 18 mukaan voidaan nähdä, että hiilineutraaliuden saavuttaminen vuonna 2035 ei toteudu kummallakaan skenaariolla rakennusteollisuuden ja rakennetun ympäristön hiilijalanjäljen osalta. Rakennusteollisuus on tarkastellut tilannetta myös tarkemmalla tasolla kuvan 19 mukaisesti. Kuvassa 19 näkyy rakennusteollisuuden ja rakennetun ympäristön hiilijalanjäljen kehittyminen vuosien 2017 ja 2050 välillä, sekä perusskenaarion, että innovatiivisten ratkaisujen -skenaarion osalta. Sen mukaan rakennusmateriaaleille ei odoteta merkittävää hiilidioksidipäästöjen pienentymistä, vaan käyttövaiheen energian kulutuksen hiilidioksidipäästöjen nähdään olevan suurin vaikuttaja tavoitteiden saavuttamisessa.



Kuva 19: Rakennusteollisuuden ja rakennetun ympäristön hiilijalanjäljen kehittyminen vuosina 2017–2050. Perusskenaario positiivisella y-akselilla sekä innovatiiviset ratkaisut-skenaarion aikaansaama lisävähennys negatiivisella y-akselilla. (Raivio *et al.* 2020, s. 26)

Myös tuotevalmistajilla on ympäristötavoitteita tulevaisuudelle. Esimerkiksi Ruduksella, Parmalla ja Parocilla on tavoitteena puolittaa yrityksensä hiilidioksidipäästöt. Tavoitevuodet ja vertailuvuodet vaihtelevat hieman yrityksen mukaan, mutta lähtökohtaisesti vertailuvuosi on 2019 tai 2020 ja tavoitevuosi noin 2035. (Rudus Oy *n.d.* b; Parma Oy *n.d.*; Paroc Group Oy *n.d.*) Käytännössä tämä tarkoittaa 5 % vähennystä hiilidioksidipäästöissä vuosittain. Myös hiilineutraalius on joillakin tuotevalmistajilla tavoitteena vuoteen 2050 mennessä, kuten esimerkiksi Ruduksella (Rudus Oy *n.d.* b). Yritykset pyrkivät saavuttamaan ympäristötavoitteensa kehittämällä lisää vähähiilisiä rakennusmateriaaleja, sekä kehittämällä jo vähähiilisiä rakennusmateriaaleja vielä pidemmälle. Tämä kehitystyö auttaa, niin yrityksiä kuin asiakkaita saavuttamaan vähähiilisyystavoitteensa. (Rudus Oy *n.d.* a)

Näiden tietojen mukaan vähähiilisillä materiaaleilla edesautetaan hyvin yritysten, sekä asiakkaiden ympäristötavoitteita, mutta niillä ei saavuteta Suomen hiilineutraaliustavoitteita vuoteen 2035 mennessä. Yritykset pyrkivät puolittamaan päästönsä 2035 mennessä, samaan aikaan kun Suomen tavoite on muuttua hiilineutraaliksi siihen mennessä. Vähähiilisiä materiaaleja on kehitetty jo nyt merkittävästi ja kehitystä on tulossa vielä lisää, mutta sen merkitys kokonaiskuvassa on yllättävän pieni. Jotta yritykset saavuttavat ympäristötavoitteensa, on niiden keskityttävä myös epäsuoriin päästöihin, kuten sähkön, polttoaineisiin ja kuljetuksiin. Suomen mittakaavassa rakennusmateriaalien osuus

päästöissä on 5 %:ia ja näin vähähiilisillä rakennusmateriaaleilla ei voida saavuttaa merkittävää muutosta. Tällä hetkellä vähähiilisillä materiaaleilla voidaan tutkimuksen tuloksien mukaan saavuttaa suurimmillaan 40 % vähennys hiilidioksidipäästöissä. Tämä ei Suomen mittakaavassa ole merkittävä muutos, mutta yritysten ympäristötavoitteiden suhteen on. Vähähiilisiä materiaaleja tulee markkinoille varmasti lisää ja entistä kehittympiä vaihtoehtoja, niin yritysten omien tavoitteiden takia kuin Suomen hiilineutraalustavoitteen takia.

6. YHTEENVETO

Tutkimuksessa käytiin läpi eri runkoratkaisuilla hallirakennukselle syntyviä hiilijalanjälkiä. Eri runkovaihtoehdot olivat betoni, teräs, puu, betonirunko puukatolla, teräsrunko puukatolla, sekä yhdistetty runko. Yhdistetyssä runkoratkaisussa on betonipilarit, teräsristikot ja yläpohjana puinen elementtikatto. Näistä jokaiselle runkoratkaisulle laskettiin hiilijalanjäljet erilaisilla materiaaleilla. Materiaalit luokiteltiin tavanomaisiin ja vähähiilisiin. Lisäksi vertailun vuoksi laskentaan otettiin myös Rakentamisen päästötietokannan arvot tavanomaisille rakennusmateriaaleille. Tavanomaisia materiaaleja olivat muun muassa perinteinen mineraalivilla eristeenä, normaali betoni runkorakenteissa, sekä perinteinen ontelolaatta yläpohjassa. Vähähiiliseksi materiaaleiksi käytettiin vähähiilistä mineraaliviljaa, vihreää betonia, sekä PIR-eristeistä sandwichelementtiä.

Materiaalien GWP-arvot saatiin tuotteiden EPD-selosteista valmistajien sivuilta ja Rakennustiedon sivuilta julkaistujen RTS EPD-ympäristöselosteiden hausta. Rakentamisen päästötietokannan arvot löytyvät CO2data.fi sivustolta. Laskennassa otettiin huomioon vain elinkaariarvion moduulit A1-A4 ja C1-C4. Tämä täytyy ottaa huomioon, kun tuloksia lukee EPD-selosteista. Rakentamisen päästötietokannasta käytettiin materiaalien tyyppi-arvoja. Tällöin laskennan tulokset paremmin vertailtavissa tuotteiden EPD-arvojen tulosten kanssa. Päästötietokannan sivuilta löytyviä konservatiivista kerrointa ja hukkakerrointa ei otettu huomioon, koska ne eivät olisi tuoneet laskentaa lisäarvoa.

Tutkimuksen laskenta toteutettiin Excel-ohjelmalla. Laskennassa taulukoitiin hallin kaikki rakenteet ja niiden sisältämät materiaalit. Materiaalien GWP-arvot kerrottiin määrätietojen mukaisesti vastaamaan materiaalien todellisia määriä rakenteissa. Lopuksi kaikki materiaalien GWP-arvot summattiin, jolloin saatiin rakenteiden hiilijalanjäljet. Kun hallin kaikkien rakenteiden hiilijalanjäljet summattiin, saatiin kokonaisen hallin kokonaishiilijalanjälki. Tutkimuksen laskennasta saatiin eri runkoratkaisuille hallin hiilijalanjäljiksi seuraavat tulokset, taulukko 1.

Taulukko 1: Rungoiltaan erilaisten hallirakennusten kokonaishiilijalanjäljet.

Tavanomaisilla materiaaleilla		
Betonirunko	540 000	kg CO ₂ e
Teräsrunko	611 000	kg CO ₂ e
Puurunko	545 000	kg CO ₂ e
Betonirunko ja puukatto	480 000	kg CO ₂ e
Teräsrunko ja puukatto	515 000	kg CO ₂ e
Yhdistetty runko	492 000	kg CO ₂ e
Vähähiilisillä materiaaleilla		
Betonirunko	321 000	kg CO ₂ e
Teräsrunko	424 000	kg CO ₂ e
Puurunko	342 000	kg CO ₂ e
Betonirunko ja puukatto	295 000	kg CO ₂ e
Teräsrunko ja puukatto	355 000	kg CO ₂ e
Yhdistetty runko	329 000	kg CO ₂ e
Rakentamisen päästötietokannan arvoilla		
Betonirunko	493 000	kg CO ₂ e
Teräsrunko	578 000	kg CO ₂ e
Puurunko	485 000	kg CO ₂ e
Betonirunko ja puukatto	475 000	kg CO ₂ e
Teräsrunko ja puukatto	511 000	kg CO ₂ e
Yhdistetty runko	492 000	kg CO ₂ e

Tuloksia tutkittiin runkoratkaisujen kuin rakenneosien suhteen. Runkoratkaisujen hiilijalanjälkiä vertailtiin, sekä tutkittiin miten paljon yhden rakenteen muutos vaikuttaa hallin kokonaishiilijalanjälkeen. Eri runkoratkaisujen tulokset näkyvät yllä olevassa taulukossa 1. Tavanomaisilla ja vähähiilisillä materiaaleilla vähähiilisin vaihtoehto on betonirunkoinen halli puisella kattoelementtiyläpohjalla. Toiseksi paras vaihtoehto tavanomaisilla materiaaleilla laskettaessa yhdistettyrunko. Vähähiilisillä materiaaleilla laskettaessa se on betonirunko. Yhden rakenteen materiaalin muuttaminen tuo näiden laskelmien mukaan merkittävän hyödyn. Esimerkiksi tavanomaisilla materiaaleilla betonirunkoisen hallin hiilijalanjälki pienenee 11 %, kun yläpohjaksi vaihdetaan puinen kattoelementti, vähähiilisillä se on 9 %.

Tuloksiksi saatiin, että rakenneosista hiilijalanjäljen suhteen merkittävimpiä ovat yleisesti perustukset, ulkoseinät ja alapohja. Vähähiilisillä materiaaleilla rakenneosien välinen hiilijalanjälkien ero on huomattavasti pienempi kuin tavanomaisilla. Tämän takia vähähiilisiä materiaaleja käytettäessä esimerkiksi rungon tai yläpohjan hiilijalanjälki voi muuttua yllättävän merkittäväksi kokonaiskuvassa. Muun muassa teräsrunkoisella hallilla teräsrunko on hallin merkittävin rakenneosa. Yleisesti voidaan todeta, että vähähiilisillä materiaaleilla perustusten hiilijalanjälki pieneni 50 %, alapohjien noin 40 % ja ulkoseinien noin

30 %. Nämä kaikki olivat tavanomaisilla materiaaleilla laskettaessa merkittävimpiä rakenneosia hiilijalanjäljen suhteen.

Tutkimuksessa käsiteltiin myös tarkemmin puurunkoisen hallin hiilijalanjäljen jakautumista eri rakenneosille. Tavanomaisilla materiaaleilla puurunkoisen hallin hiilijalanjälki muodostuu seuraavasti: 4 % puurunko, 7 % nosturintukirunko, 28 % perustukset, 16 % alapohja, 3 % sokkeli, 26 % ulkoseinät, 16 % yläpohja. Näistä rakenneosista ulkoseinät ovat toiseksi merkittävin rakenneosa, kun perustukset ovat merkittävin. Tämä takia vähähiilisiä materiaaleja tutkittaessa testattiin mahdollisia eri sandwichelementtejä, joita hallin ulkoseinä voi käyttää. Vertailussa oli eri valmistajilta sandwich-elementtejä eri eristemateriaaleilla, mineraalivillaisia, PIR- ja PUR-eristeisiä. Niistä Ruukin SP2E F-PIR sandwich -paneeli on vähähiilisin vaihtoehto ulkoseinäelementiksi.

Tietokantojen vaikutus hiilijalanjälkeen tutkittiin vertailemalla tavanomaisia materiaalien tuloksia vähähiilisten materiaalien ja rakentamisen päästötietokanan arvoilla laskettuihin tuloksiin. Tulokseksi saatiin, että käytetyllä tietokannalla on huomattava vaikutus tuloksiin. Vähähiilisiä materiaaleja käytettäessä kaikkien runkoratkaisujen hiilijalanjäljet pienenevät, mutta eniten hiilijalanjälki pieneni betonirunkoisella hallilla, noin 40 %. Teräsrunkoisen hallin hiilijalanjälki pieneni vähiten, riippumatta oliko siinä puukattoa, noin 31 %. Rakentamisen päästötietokanan arvojen mukaan laskettaessa hiilijalanjäljet ovat yleisesti hieman pienemmät kuin tavanomaisien materiaalien EPD-tietojen perusteella laskettuna. Betonirunkoisen hallin hiilijalanjälki on 9 % pienempi Rakentamisen päästötietokanan kautta laskettuna kuin tavanomaisilla materiaaleilla laskettaessa. Teräsrunkoisella hallilla se on 5,4 % pienempi. Päästötietokanan arvot eivät ole suoraan verrattavissa EPD-selosteiden GWP-arvoihin, koska päästötietokanta perustuu keskiarvotietoihin. Tutkimuksen laskelmissa suurimmillaan päästötietokanan arvoilla saatiin puurunkoiselle hallirakennukselle 11 % pienempi hiilijalanjälki kuin tavanomaisilla materiaaleilla laskettaessa tuotteiden EPD-selosteiden kautta. Tämä kautta nähdään, ettei päästötietokanan arvoilla laskettuja tuloksia pidä vertailla suoraan EPD-selosteiden kautta laskettujen tuloksien kanssa. Jos hiilijalanjälkilaskentaa tehdään vähähiilisille materiaaleille, päästötietokanan arvot ovat jo hyvin kaukana niiden todellisista hiilijalanjäljistä, joten päästötietokanan arvoja ei tulisi käyttää siihen tarkoitukseen.

Lopuksi tutkimuksessa pohdittiin, vastaavatko vähähiiliset materiaalit Suomen vähähiilisyystavoitteeseen tai yritysten ympäristö tavoitteisiin. Katsauksen mukaan näillä vähähiilisillä rakennusmateriaaleilla ei yksinään päästä tavoitteisiin. Suomi tähtää hiilineutraaliuteen vuoteen 2035 mennessä ja tuotevalmistajat pyrkivät puolittamaan päästönsä

2035 mennessä. Vähähiilisten rakennusmateriaalien kehitys on ja tulee olemaan tuotevalmistajien tärkein keino tavoittaa heidän ympäristötavoitteensa. Tätä kautta myös vähähiiliset rakennustuotteet auttavat asiakkaita saavuttamaan omia ympäristötavoitteita. Näiden vaikutus suuressa mittakaavassa Suomen hiilineutraaliustavoitteeseen ei ole kuitenkaan riittävä. Rakennusteollisuuden teettämän Vähähiilinen rakennusteollisuus 2035 Osa 4. -raportin mukaan, kuva 17, rakennusmateriaalien hiilijalanjäljen osuus Suomen päästöistä on vain 5 %. Lisäksi raportin mukaan rakennetun ympäristön käyttövaiheen energiankulutuksen päästöt ovat jopa 23 %. Rakennetun ympäristön elinkaaren hiilijalanjäljen osuus Suomen päästöistä on suuri, mutta itsessään rakennusmateriaalien osuus siitä on hyvin pieni. Jos vähähiilillä materiaaleilla saataisiin 50 % pienempi hiilijalanjälki kuin tavanomaisilla materiaaleilla, se vähentäisi Suomen kokonaispäästöjä vasta 2,5 %. Tällä hetkellä vähähiilillä materiaaleilla ei päästä 50 % hiilijalanjäljen vähennykseen, vaan suurimmillaan se on tämän tutkimuksen tuloksien perusteella 40 %. Vähähiilille rakennusmateriaaleille on näin tarvetta, koko ajan kasvavampi kysyntä, sekä vahva tarve myös niiden kehitykselle. Tämänhetkiset rakennusmateriaalit eivät riitä vielä vastaamaan tuotevalmistajien, eikä Suomen ympäristötavoitteisiin.

LÄHTEET

Bionova Oy (2017). Tiekartta rakennuksen elinkaaren hiilijalanjäljen huomioimiseksi rakentamisen ohjauksessa. PDF. Saatavissa (viitattu 9.4.2021): https://ym.fi/documents/1410903/38439968/Tiekartta-rakennuksen-elinkaaren-hiilijalanjaljen-huomioonottamiseksi-rakentamisen-ohjauksessa-4B3172BC_4F20_43AB_AA62_A09DA890AE6D-129197.pdf/

Judl, J., Horn, S., Niemistö, J., Suikkanen, J., Lazarevic, D. & Lepistö, K. (2021). Elinkaariarviointi tukee kestävyysmurrosta. Suomen ympäristökeskus SYKE. PDF. Saatavissa (viitattu 6.6.2023): https://issuu.com/suomenymparistokeskus/docs/fi_syke-esittelee_elinkaariarviointi-lca_12-2021

Kierrätysteollisuus ry (2019). Kun jäte lakkaa olemasta jäte – sujuvammalla menettelyllä materiaalit kiertoon. Kolumni. Saatavissa (viitattu 26.4.2021): <https://ytpiitto.fi/kun-jate-lakkaa-ole-masta-jate/>

MTK (n.d.). Maa- ja metsätaloustuottajien ilmastosanasto. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 6.6.2023): <https://www.mtk.fi/ilmastosanastoa>

One Click LCA (n.d. a). Ympäristöseloste (EPD) mitä ne ovat, mihin niitä tarvitaan ja miten niitä laaditaan? PDF. Saatavissa (viitattu 6.6.2023): <https://www.oneclicklca.com/wp-content/uploads/2021/03/Ymp%C3%A4rist%C3%B6seloste-EPD-pikaopas.pdf>

One Click LCA (n.d. b). FAQ and Guidance, Get started with One Click LCA. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 9.4.2021): <https://www.oneclicklca.com/support/faq/>

Parma Oy (n.d.). Ympäristövastuu. Verkkosivu. Saatavilla (viitattu 23.4.2023): <https://parma.fi/vastuullisuus/ymparistovastuu/>

Paroc Group Oy (n.d.). Vastuullisesti toimimalla teemme maailmasta paremman. Verkkosivu. Saatavilla (viitattu 11.5.2023): <https://www.paroc.fi/vastuullisuus>

Pekkarinen, J. (2020). Jos et tiedä mitä EPD tarkoittaa, lue tämä!. Labwall. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu): <https://lapwall.fi/jos-et-tieda-mita-epd-tarkoittaa-lue-tama/>

Raivio, T., Laine, A., Klimscheffskij, M., Heino, A. & Lehtomäki, J. (2020). Vähähiilinen rakennusteollisuus 2035, Osa 4. Rakennusteollisuuden ja rakennetun ympäristön vähähiilisyyden tiekartta 2020–2035–2050, Lopullinen versio. Gaia Consulting Oy & Rakennusteollisuus RT. PDF. Saatavissa (viitattu 2.5.2023): https://www.rt.fi/globalassets/ymparisto-ja-energia/vahahiilisyys_uudet/rt_4.-raportti_vahahiilisyuden-tiekartta_lopullinen-versio_clean.pdf

Rakennusteollisuus RT ry (n.d. a). Kestävä rakentaminen on vastuullista rakentamista. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 7.5.2021): <https://www.rakennusteollisuus.fi/Tietoa-alasta/Ilmasto-ymparisto-ja-energia/Kestava-rakentaminen/>

Rakennusteollisuus RT ry (n.d. b). Rakennuksen elinkaari kestävä rakentamisen lähtökohtana. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 8.5.2021): <https://www.rakennusteollisuus.fi/Tietoa-alasta/Ilmasto-ymparisto-ja-energia/Kestava-rakentaminen/Rakennuksen-elinkaari/>

Rakennusteollisuus RT (n.d. c). Rakenteet ja rakennustuotteet ovat tärkeä osa kestävä rakentamista. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 14.10.2021): <https://www.rakennusteollisuus.fi/Tietoa-alasta/Ilmasto-ymparisto-ja-energia/Kestava-rakentaminen/Rakenteiden-ja-rakennustuotteiden-merkitys/>

Rakennustieto (n.d.). RTS EPD-ympäristöseloste. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 18.4.2021): <https://cer.rts.fi/epd-ymparistoseloste/>

Rudus Oy (n.d. a). Hiilikädenjälki - päästövähennyksiä asiakkaille. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 23.4.2023): <https://www.rudus.fi/vastuullisuus/hiilikadenjalki>

Rudus Oy (n.d. b). Toimintamme hiilijalanjälki. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 23.4.2023): <https://www.rudus.fi/vastuullisuus/hiilijalanjalki>

Siitonen S. (2023). Hiilikädenjälki – mitä se tarkoittaa ja kuinka se määritellään? Artikkelit. Saatavissa (viitattu 6.6.2023): <https://www.openco2.net/fi/artikkelit/hiilikadenjalki---mita-se-tarκοittaa-ja-kuinka-se-maaritellaan>

Sitra. n.d. Tulevaisuussanasto. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 6.6.2023): <https://www.sitra.fi/tulevaisuussanasto/>

Suomen ympäristökeskus (2023). F-kaasut ja otsonikerrosta heikentävät aineet. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 6.6.2023): <https://www.ymparisto.fi/fi/luvat-ja-velvoitteet/f-kaasut-ja-otsonikerrosta-heikentavat-aineet>

Suomen ympäristökeskus (2022). (versio 1.00.008, 2022-12-06). Rakentamisen päästötietokanta. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 30.3.2023): <https://co2data.fi/rakentaminen/>

SFS-EN 15804 (2012) + A2 (2019). Kestävä rakentaminen. Rakennustuotteiden ympäristöselosteet. Laadinnan yleissäännöt. Suomen standardoimisliitto SFS.

SFS-EN ISO 14067 (2018). Kasvihuonekaasut. Tuotteiden hiilijalanjälki. Hiilijalanjäljen laske-
mista koskevat vaatimukset ja ohjeet. Suomen standardoimisliitto SFS.

Tilastokeskus 2023. 12fy -- Rakennus- ja asuntotuotanto. 1995M01-2023M02. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 8.5.2023): https://pxdata.stat.fi/PxWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin_ras/statfin_ras_pxt_12fy.px/

Valtiovarainministeriö (2023). Valtiovarainministeriön julkaisuja – 2023:10. Rakentaminen 2023–2024. Kevät 2023. Talousnäkymät. PDF. Saatavissa (viitattu 8.5.2023): https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/164645/VM_2023_10.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Ympäristöministeriö (n.d. a). Hiilineutraali Suomi 2035. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 23.4.2023): <https://ym.fi/hiilineutraalisuomi2035>

Ympäristöministeriö (n.d. b). Vähähiilinen rakentaminen. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 12.3.2021): <https://ym.fi/vahahiilinen-rakentaminen>

Ympäristöministeriö (n.d. c). Vähähiilisen rakentamisen tiekartta. Verkkosivu. Saatavissa (viitattu 12.3.2021): <https://ym.fi/vahahiilisen-rakentamisen-tiekartta>

Ympäristöministeriö 1010/2017. Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen energiatehokkuudesta. PDF. Saatavissa (viitattu 10.4.2023): <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2017/20171010#Pidm45053757327216>

Ympäristöministeriö (2019). Rakennuksen vähähiilisyyden arviointimenetelmä. PDF. Saatavissa (viitattu 9.4.2021): https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/161761/YM_2019_22_Rakennuksen_vahahiilisyyden_arviointimenetelma.pdf?sequence=1&isAllowed=y

LIITE A: RUNKORATKAISUJEN RAKENTEIDEN KOKO- JA MÄÄRÄTIEDOT

Betonirunko		kpl	b [m]	h [m]	l [m]
Runko	HI-palkit	7	0,48	1,80	19,52
	TB-pilarit	18	0,48	0,48	7,00
	Siltanosturin konsolit	14		0,48	0,27
Siltanosturin tukirunko	HEA-palkit	12			8,20
Paalut	Betoni, paalut TB300	96	0,3	0,3	30
Anturat	Betoni	14	3,20	1,10	1,95
	Betoni, tuulipilareiden anturat	4	1,95	0,70	1,95
	Betoni, pilarinosto	18	0,56	1,39	0,56
Alapohja	Maanvarainen betonilaatta	1		19,52	49,68
Sokkeli	Sokkelielementti 1	2		1,34	50,26
	Sokkelielementti 2	2		1,34	19,22
Ulkoseinät	PVP-elementti 1	2		9,50	50,18
	PVP-elementti 2	2		9,50	19,52
Yläpohja	Ontelolaattayläpohja			49,68	19,56

Teräsrunko		kpl	b [m]	h [m]	l [m]
Runko	Teräsristikot	9			19,50
	<u>Liittopilarit:</u>				
	Betonitäyttö	22	0,23	0,23	8,05
	Teräs	22			8,05
Siltanosturin tukirunko	HEA-palkit	16			6,20
Paalut	Betoni, paalut TB300	120	0,3	0,3	30
Anturat	Betoni	18	3,20	1,10	1,95
	Betoni, tuulipilareiden anturat	4	1,95	0,70	1,95
	Betoni, pilarinosto	22	0,41	1,39	0,41
Alapohja	Maanvarainen betonilaatta	1		19,50	49,85
Sokkeli	Sokkelielementti 1	2		1,34	50,43
	Sokkelielementti 2	2		1,34	19,20
Ulkoseinät	PVP-elementti 1	2		9,40	50,35
	PVP-elementti 2	2		9,40	19,50
Yläpohja	Poimulevy-yläpohja			49,85	19,54

Puurunko		kpl	b [m]	h [m]	l [m]
Runko	Liimapuupalkki	7	0,265		33,90
	Liimapuupilari	14	0,265	0,585	7,00
	Liimapuutuulipilarit	4	0,140	0,250	7,00
Siltanosturin tukirunko	Teräspilarit	14			5,30
	HEA-palkit	12			8,25
Paalut	Betoni, paalut TB300	96	0,3	0,3	30
Anturat	Betoni	14	3,20	1,10	1,95
	Betoni, tuulipilareiden anturat	4	1,95	0,70	1,95
	Betoni, pilarinosto	18	0,985	1,39	0,30
Alapohja	Maanvarainen betonilaatta	1		19,50	49,50
Sokkeli	Sokkelielementti 1	2		1,34	50,10
	Sokkelielementti 2	2		1,34	19,20
Ulkoseinät	PVP-elementti 1	2		9,90	50,00
	PVP-elementti 2	2		9,90	19,50
Yläpohja	Kattoelementti-yläpohja			49,50	19,54

Betonirunko ja puukatto		kpl	b [m]	h [m]	l [m]
Runko	HI-palkit	7	0,48	1,80	19,52
	TB-pilarit	18	0,48	0,48	7,00
	Siltanosturin konsolit	14		0,48	0,27
Siltanosturin tukirunko	HEA-palkit	12			8,20
Paalut	Betoni, paalut TB300	96	0,3	0,3	30
Anturat	Betoni	14	3,20	1,10	1,95
	Betoni, tuulipilareiden anturat	4	1,95	0,70	1,95
	Betoni, pilarinosto	18	0,56	1,39	0,56
Alapohja	Maanvarainen betonilaatta	1		19,52	49,68
Sokkeli	Sokkelielementti 1	2		1,34	50,26
	Sokkelielementti 2	2		1,34	19,22
Ulkoseinät	PVP-elementti 1	2		9,50	50,18
	PVP-elementti 2	2		9,50	19,52
Yläpohja	Kattoelementti-yläpohja			49,68	19,56

Teräsrunko ja puukatto		kpl	b [m]	h [m]	l [m]
Runko	Teräsristikot	7			19,50
	<u>Liittopilarit:</u>				
	Betonitäyttö	18	0,23	0,23	8,05
	Teräs	18			8,05
Siltanosturin tukirunko	HEA-palkit	12			8,20
Paalut	Betoni, paalut TB300	96	0,3	0,3	30
Anturat	Betoni	14	3,20	1,10	1,95
	Betoni, tuulipilareiden anturat	4	1,95	0,70	1,95
	Betoni, pilarinosto	18	0,41	1,39	0,41
Alapohja	Maanvarainen betonilaatta	1		19,50	49,20
Sokkeli	Sokkelielementti 1	2		1,34	50,03
	Sokkelielementti 2	2		1,34	19,20
Ulkoseinät	PVP-elementti 1	2		9,70	49,95
	PVP-elementti 2	2		9,70	19,50
Yläpohja	Kattoelementti-yläpohja			49,40	19,50

Yhdistetty runko		kpl	b [m]	h [m]	l [m]	
	Runko	Teräsristikot	7			19,50
		TB-pilarit	18	0,38	0,38	8,25
	Siltanosturin tukirunko					
	HEA-palkit	12			8,20	
	Paalut					
	Betoni, paalut TB300	96	0,3	0,3	30	
	Anturat					
	Betoni	14	3,20	1,10	1,95	
	Betoni, tuulipilareiden anturat	4	1,95	0,70	1,95	
	Betoni, pilarinosto	18	0,46	1,39	0,46	
	Alapohja					
	Maanvarainen betonilaatta	1		19,50	49,58	
	Sokkeli					
	Sokkelielementti 1	2		1,34	50,03	
	Sokkelielementti 2	2		1,34	19,20	
Ulkoseinät						
PVP-elementti 1	2		9,70	50,08		
PVP-elementti 2	2		9,70	19,50		
Yläpohja						
Kattoelementti-yläpohja			49,58	19,54		

LIITE B: RUNKORATKAISUJEN RAKENTEIDEN LASKETUT HIILIJALANJÄLJET

Tavanomaisilla materiaaleilla	
Betonirunko	Yhteensä kg CO2e
Betonirunko	36 000
Nosturin tukirunko	25 000
Perustukset	154 000
Alapohja	87 000
Sokkeli	16 000
Ulkoseinät	135 000
Yläpohja	88 000
yht.	540 000
Teräsrunko	Yhteensä kg CO2e
Teräsrunko, betonitäyttö	101 000
Nosturin tukirunko	25 000
Perustukset	191 000
Alapohja	88 000
Sokkeli	16 000
Ulkoseinät	134 000
Yläpohja	57 000
yht.	611 000
Puurunko	Yhteensä kg CO2e
Puurunko	21 000
Nosturin tukirunko	40 000
Perustukset	153 000
Alapohja	87 000
Sokkeli	16 000
Ulkoseinät	140 000
Yläpohja	87 000
yht.	545 000
Betonirunko, puukatto	Yhteensä kg CO2e
Betonirunko	36 000
Nosturin tukirunko	25 000
Perustukset	154 000
Alapohja	87 000
Sokkeli	16 000
Ulkoseinät	135 000
Yläpohja	27 000
yht.	480 000
Teräsrunko, puukatto	Yhteensä kg CO2e
Teräsrunko, betonitäyttö	80 000
Nosturin tukirunko	25 000
Perustukset	143 000
Alapohja	86 000
Sokkeli	16 000
Ulkoseinät	137 000

Yläpohja	27 000
yht.	515 000
Yhdistetty runko	Yhteensä kg CO2e
Betonirunko	56 000
Nosturin tukirunko	25 000
Perustukset	143 000
Alapohja	87 000
Sokkeli	16 000
Ulkoseinät	137 000
Yläpohja	27 000
yht.	492 000

Vähähiilisillä materiaaleilla	
Betonirunko	Yhteensä kg CO2e
Betonirunko	18 000
Nosturin tukirunko	25 000
Perustukset	74 000
Alapohja	54 000
Sokkeli	9 000
Ulkoseinät	91 000
Yläpohja	51 000
yht.	321 000
Teräsrunko	Yhteensä kg CO2e
Teräsrunko, betonitäyttö	99 000
Nosturin tukirunko	25 000
Perustukset	92 000
Alapohja	54 000
Sokkeli	9 000
Ulkoseinät	90 000
Yläpohja	56 000
yht.	424 000
Puurunko	Yhteensä kg CO2e
Puurunko	21 000
Nosturin tukirunko	40 000
Perustukset	74 000
Alapohja	53 000
Sokkeli	9 000
Ulkoseinät	94 000
Yläpohja	51 000
yht.	342 000
Betonirunko, puukatto	Yhteensä kg CO2e
Betonirunko	18 000
Nosturin tukirunko	25 000
Perustukset	74 000
Alapohja	54 000
Sokkeli	9 000
Ulkoseinät	91 000

Yläpohja	25 000
yht.	295 000
Teräsrunko, puukatto	Yhteensä kg CO2e
Teräsrunko, betonitäyttö	79 000
Nosturin tukirunko	25 000
Perustukset	74 000
Alapohja	53 000
Sokkeli	9 000
Ulkoseinät	92 000
Yläpohja	25 000
yht.	355 000
Yhdistetty runko	Yhteensä kg CO2e
Betonirunko	52 000
Nosturin tukirunko	25 000
Perustukset	74 000
Alapohja	53 000
Sokkeli	9 000
Ulkoseinät	92 000
Yläpohja	25 000
yht.	329 000

Rakentamisen päästötietokannan arvoilla	
Betonirunko	Yhteensä kg CO2e
Betonirunko	35 000
Nosturin tukirunko	22 000
Perustukset	144 000
Alapohja	58 000
Sokkeli	17 000
Ulkoseinät	135 000
Yläpohja	83 000
yht.	493 000
Teräsrunko	Yhteensä kg CO2e
Teräsrunko, betonitäyttö	90 000
Nosturin tukirunko	22 000
Perustukset	179 000
Alapohja	58 000
Sokkeli	16 000
Ulkoseinät	134 000
Yläpohja	80 000
yht.	578 000
Puurunko	Yhteensä kg CO2e
Puurunko	8 000
Nosturin tukirunko	36 000
Perustukset	144 000
Alapohja	58 000
Sokkeli	17 000
Ulkoseinät	141 000
Yläpohja	82 000

yht.	485 000
Betonirunko, puukatto	Yhteensä kg CO2e
Betonirunko	35 000
Nosturin tukirunko	22 000
Perustukset	144 000
Alapohja	58 000
Sokkeli	17 000
Ulkoseinät	135 000
Yläpohja	65 000
yht.	475 000
Teräsrunko, puukatto	Yhteensä kg CO2e
Teräsrunko, betonitäyttö	71 000
Nosturin tukirunko	22 000
Perustukset	143 000
Alapohja	57 000
Sokkeli	17 000
Ulkoseinät	138 000
Yläpohja	64 000
yht.	511 000
Yhdistetty runko	Yhteensä kg CO2e
Betonirunko	50 000
Nosturin tukirunko	22 000
Perustukset	143 000
Alapohja	56 000
Sokkeli	17 000
Ulkoseinät	138 000
Yläpohja	65 000
yht.	492 000