Tampereen yliopisto

Markus Suuronen

HIILIJALANJÄLJEN, KIERTOTALOUSASTEEN JA PITKÄAIKAISKESTÄVYYSINDEKSIN MÄÄRITTÄMINEN RAKENNETYYPEILLE

Kandidaatintyö
Rakennetun ympäristön tiedekunta
Huhtikuu 2021

TIIVISTELMÄ

Markus Suuronen: Hiilijalanjäljen, kiertotalousasteen ja pitkäaikaiskestävyysindeksin määrittäminen rakennetyypeille (Calculating carbon footprint, recycle rate and durability index for structures)
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Rakennustekniikka
Huhtikuu 2021

Kiristetystä lainsäädännöstä ja tilaajien omista vaatimuksista johtuen rakennuksen hiilijalanjälkeen ja koko elinkaareen on alettu kiinnittää aiempaa enemmän huomiota. Yksi hiilijalanjäljen kannalta tärkeimmistä päätöksistä rakennuksen suunnitteluvaiheessa on sopivien rakennetyyppien valinta.

Rakennetyyppejä on aiemmin vertailtu lähinnä käytönaikaiseen energiatehokkuuteen perustuvalla U-arvolla. Elinkaariajattelun mukaisesti rakennuksista tulisi tarkastella koko elinkaaren aikaisia vaikutuksia. Koko elinkaarena tarkastelua tarvitaan uudenlaisia mittareita. Tällaisia mittareita ovat esimerkiksi hiilijalanjälki, sekä sitä sivuavat kiertotalousaste ja pitkäaikaiskestävyysindeksi. Erilaisten mittareiden pohjalta rakennetyyppejä voi tehokkaammin vertailla keskenään ja valita kulloinkin optimaalisen ratkaisun.

Pohjimmiltaan kaikki tässä työssä käsiteltyjen mittareiden vertailu perustuu hiilijalanjäljen optimointiin. Kiertotalousasteen ollessa suuri, hiilijalanjälki tyypillisesti pienenee, koska materiaalia voidaan käyttää pidempään. Tämä ei kuitenkaan päde kaikille materiaaleille, kuten puulle. Myös pitkäaikaiskestävyyden parantuessa hiilijalanjälki yleensä pienenee, koska rakennetta voidaan käyttää pidempään, eikä sen tilalle tarvitse vaihtaa uutta.

Neljän esimerkkirakenteen vertailusta havaitaan, että eri materiaalien hiilijalanjäljet poikkeavat merkittävästi toisistaan. Myös kiertotalousasteissa hajonta oli suurta materiaalikohtaisista tyypillisistä kierrätysasteiden eroista poiketen. Jotkin materiaaleista, kuten teräkset, saavuttavat lähes 100 % kierrätysasteen, kun taas esimerkiksi puuta ei käytännössä uudelleen käytetä lähes ollenkaan. Pitkäaikaiskestävyysindeksi puolestaan oli jokseenkin sama kaikilla vertailun rakenteille, ollen n. 50 vuoden paikkeilla. Poikkeuksena tästä oli peräti 83 vuoden indeksin saanut tiiliseinä.

Avainsanat: Hiilijalanjälki, elinkaari, rakennetyyppi, betoni, teräs, puu, kiertotalous, kiertotalousaste, pitkäaikaiskestävyys, pitkäaikaiskestävyysindeksi

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO 1
2. HIILIJALANJÄLKI 3
2.1 Hiilijalanjäljen laskenta 3
2.2 Hiilikädenjälki 5
3. KIERTOTALOUSASTE 6
3.1 Laskenta 7
3.2 Soveltaminen rakennetyypeille 8
4. PITKÄAIKAISKESTÄVYYSINDEKSI JA MUUT MITTARIT 9
4.1 Käyttöikä 9
4.2 Tekniset käyttöiät 10
4.3 Rakenneosien erot 10
4.4 Indeksin määritys 11
4.5 Huoltoväli 11
5. ESIMERKKIRAKENTEET 13
5.1 Kevyt ulkoseinä 14
5.1.1 Hiilijalanjälki 14
5.1.2 Kiertotalousaste 16
5.1.3 Pitkäaikaiskestävyysindeksi 17
5.2 Pientalon tiiliseinä 18
5.2.1 Hiilijalanjälki 18
5.2.2 Kiertotalousaste 19
5.2.3 Pitkäaikaiskestävyysindeksi 20
5.3 Termoranka-elementtiseinä 21
5.3.1 Hiilijalanjälki 21
5.3.2 Kiertotalousaste 23
5.3.3 Pitkäaikaiskestävyysindeksi 24
5.4 Betonisandwich-seinä 24
5.4.1 Hiilijalanjälki 25
5.4.2 Kiertotalousaste 26
5.4.3 Pitkäaikaiskestävyysindeksi 27
5.5 Tulosten vertailu ja virhelähteet 27
6. PÄÄTELMÄT 30
LÄHTEET 31

MÄÄRITELMÄ JA MERKINNÄT

kgCO2e	Hiilidioksidia vastaava päästön määrä kilogrammoina. Hiilijalanjäljen yksikkö. Kaikki päästöt laskettu niitä laskennallisesti vastaavaan hiilidioksidiekvivalenttiin muotoon. (SFS-EN ISO 14067 2018)
Hiilijalanjälki	Tuotteesta tai esimerkiksi rakennuksesta koituvat päästöt hiilidioksidiekvivalentissa muodossa. Yksikkönä on hiilidioksidiekvivalentti CO_2e. (SFS-EN ISO 14067 2018)
Hiilikädenjälki	Vastakohta hiilijalanjäljelle. Rakenteen elinkaaren aikana itseensä sitoma hiilidioksidiekvivalentti päästömäärä. (Pajula T. et al. 2018)
CMU	Circular material use rate, ks. kiertotalousaste.
Käyttöikä	Rakennetun suunniteltu käyttöikä. Laskennallisesti vähintään 95 % suunnitellun rakenteen otannasta täytyy kestää tätä ikää pidempään. (Elementtisuunnittelu 2020)
Tekninen käyttöikä	Aika, jonka rakenne kestää säilyttäen sille asetetut toimivuusvaatimukset (RT 18-10922 2008)
Pitkäaikaiskestävyysindeksi	Rakennetyypin merkitsevän osan mukaan määritelty käyttöiän vertailuarvo
Kiertotalousaste	Materiaalin uudelleen käytetyn materiaalin osuus kaikesta materiaalista (Eurostat 2018)
Huoltoväli	Aikaväli, jonka jälkeen rakenteelle tehdään tarvitut tarkastus- ja huoltotoimenpiteet (RT 18-10922 2008)

1. JOHDANTO

Rakennus- ja kiinteistöala kuluttaa merkittävän osan maailman kokonaispäästöistä. Laskentatavasta riippuen alan osuuden voidaan arvioida olevan jopa 40 % kokonaispäästöistä. Tämän takia ympäristöön ja elinkaareen on alettu kiinnittämään rakennusalalla entistä enemmän huomiota. Rakentamisessa ei enää lasketa ainoastaan rakentamisvaiheen päästöjä ja energiakulutusta, vaan on siirrytty tarkastelemaan laajemmin koko rakennuksen elinkaarta. (Punkki 2020, s. 1)

Rakennetyypeille ekologisuuden ja energiatehokkuuden mittari on tyypillisesti ollut U-arvo. U-arvo kuvaa kuitenkin vain käytönaikaista energiatehokkuutta lämmön siirtymisen muodossa. Käytön aikaisten päästöjen lisäksi rakennuksista aiheutuu ympäristöön haittoja muun muassa raaka-aineiden hankinnasta, materiaalien valmistuksesta, kuljetuksista, rakennusmaan käytöstä sekä maansiirtotöistä ja rakentamisesta (Ruuska & Häkkinen 2013). Elinkaariajattelun mukaisesti rakennetyyppejä tulisi tarkastella pidemmässä aikaluokassa ja siten huomioida esimerkiksi niiden valmistamisen hiilijalanjälki, uudelleen käytetyn materiaalin aste eli kiertotalousaste ja pitkäaikaiskestävyys.

Erityisesti hiilijalanjälki on alalla hiljalleen vakiintuva vertailumittari, jota aletaan ohjaamaan tulevina vuosina myös lainsäädännön tasolla (Puuinfo 2020). Myös kiertotalous on alan kasvavia trendejä, joka alkoi yleistymään 2010-luvun alussa. Pitkäaikaiskestävyysindeksi on puolestaan hieman uudempi termi, vaikka rakenteiden pitkäikäisyys on jo pitkään ollut yksi niiden valintakriteereistä.

Tässä työssä käsitellään nimenomaan näiden kolmen mittarin laskentaa ja määrittelyä. Mittarit ja niiden laskenta on kukin esitelty omissa luvuissaan. Mittarit määritellään nimenomaan rakennetyypeille. Esimerkiksi hiilijalanjälki voitaisiin kuitenkin laskea myös koko rakennukselle (Puuinfo 2020). Mittareiden esittelyn jälkeen niiden käyttöä havainnollistetaan vielä esimerkkirakenteiden laskennan avulla.

Tutkimus on tehty silmällä pitäen nimenomaan suunnitteluvaiheen rakennetyyppien ja materiaalien vertailua ja valintaa. Näitä, ja muita alalla vakiintuneita mittareita hyödyntäen suunnittelijan on helpompi valita sekä rakenneteknisesti, että koko elinkaaren laajuisesti tarkastellen mahdollisimman optimaalinen rakenneratkaisu. Kaikki kolme mittaria perustuvat pohjimmiltaan hiilijalanjäljen pienentämiseen rakennetyypin koko elinkaaren ajalta. Kiertotalousaste ja pitkäaikaiskestävyysindeksi tosin vaikuttavat siihen enemmänkin epäsuorasti.

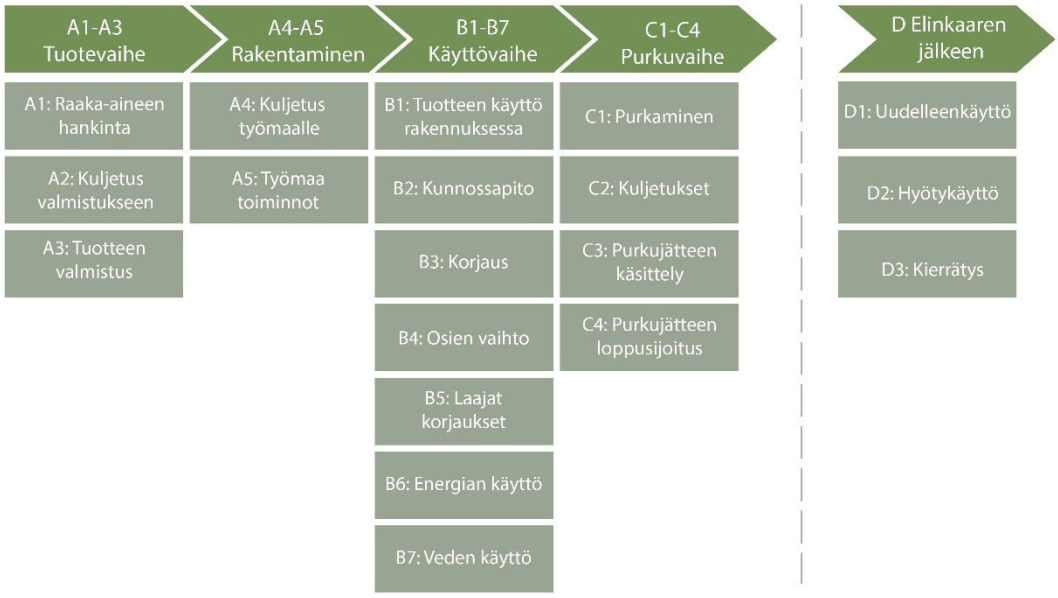
Tämä tutkimus on toteutettu kirjallisuustutkimuksena jo olemassa olevaan aineistoon. Sen lisäksi pitkäaikaiskestävyysindeksin osiossa on omaa pohdintaa järkevästä määrittelytavasta.

2. HIILIJALANJÄLKI

Hiilijalanjälki on mittari, jolla kuvataan rakentamisesta aiheutuvia kasvihuonepäästöjä. Se lasketaan yksikössä, jota kutsutaan hiilidioksidiekvivalentiksi [kg CO_2e]. Yksikössä on muunneltu eri kasvihuonekaasujen erilaiset vaikutukset ilmaston lämpenemiseen hiilidioksidin vastaavaksi vaikutukseksi. Hiilijalanjäljen laskennassa voidaan selvittää rakennetyypin tai tarvittaessa koko rakennuksen aiheuttamat päästöt koko sen elinkaaren ajalta, alkaen rakennustuotteiden valmistuksesta ja päättyen rakennuksen purkamiseen. (Vesitaito)

2.1 Hiilijalanjäljen laskenta

Rakenteen hiilijalanjälki lasketaan standardien EN-15978 (Sustainability of construction works) ja EN-15804 (Kestävä rakentaminen) pohjalta. Standardeissa rakentamisen aiheuttamat päästöt ja haitat on jaoteltu eri moduuleihin A–D, jotka jakautuvat ajallisesti rakenteen olemassaolon eri vaiheisiin. Moduulit on lisäksi jaoteltu vielä omiin alakohtiinsa (esimerkiksi B1–B7), jotka kuvaavat tarkemmin tiettyä osaa kyseisestä moduulista. Esimerkiksi moduuli B2 kuvaa käytönaikaisia huoltotöitä ja B3 puolestaan käytönaikaisia korjaustöitä. (EN 15804 2012) Eri moduulit on esitelty tarkemmin kuvassa 1.

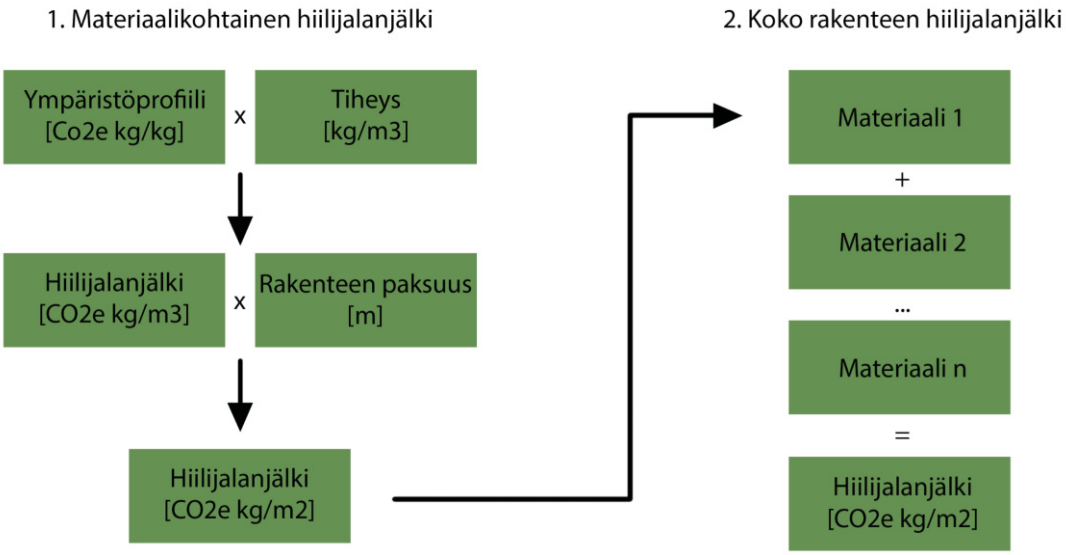


Kuva 1. *Rakenteen elinkaaren eri vaiheet moduuleina SFS ISO EN-15978-standardin mukaisesti*

Hiilijalanjäljellä tarkoitetaan usein koko rakennuksen hiilijalanjälkeä. Rakennetyyppien välistä vertailua varten se on selkeämpi muuttaa rakenteen pinta-ala yksikköä kohti laskettavaan muotoon. Tällöin yksikkönä on $kgCO_2e/m^2$. Yksikkö kuvaa rakennetyypin CO_2-ekvivalentteja päästöjä kilogrammoina neliömetrin kokoiselle alueelle.

Hiilijalanjälki lasketaan tarkastelemalla ensin rakennetyypin jokaisen osan ja rakennekerroksen hiilijalanjälki. Lopuksi lisätään niiden kaikkien hiilijalanjäljet yhteen. Yksittäisten materiaalien hiilijalanjälki arvioidaan huomioiden niiden tuotevaiheen kohdat A1-A3 eli hankinta, kuljetus ja tuotteen valmistus. Koko rakenteen laskentaan voidaan käyttää valmiiksi tutkittuja arvoja, kuten esimerkiksi Ympäristöministeriön co2data.fi -sivuston referenssiarvoja. Sivustolla on listattuna paljon erilaista tietoa eri rakennusmateriaaleista, sekä materiaalikohtaisia taustaraportteja. Hiilijalanjäljen laskentaan tarvitaan sivuston erilaisten rakennusmateriaalien tiheyksiä yksikössä [kg/m^3] ja niiden ympäristöprofiileja yksikössä [kg CO_2e/kg]. (co2data.fi)

Yksinkertaisesti kertomalla tiheys materiaalin ympäristöprofiililla saadaan aiheutuneet päästöt muutettua tilavuutta kohti mitattuun yksikköön [kg CO_2e/m^3]. Seuraavaksi saatu luku kerrotaan rakenteen paksuudella, jolloin saadaan kyseisen materiaalin päästöt halutussa muodossa neliömetriä kohti laskettuna. Yksikkönä on siten [CO_2e kg/m^2]. Laskentaprosessi on esitetty yksinkertaistettuna kuvan 2 kaaviossa.



Kuva 2. *Kaavio laskennan prosessista*

2.2 Hiilikädenjälki

Hiilikädenjälki on vastakohta hiilijalanjäljelle. Hiilikädenjäljellä mitataan kunkin tuotteen aiheuttamia positiivisia vaikutuksia ympäristölle. Tyypillinen esimerkki tuotteen hiilikädenjäljestä on puun kyky sitouttaa hiilidioksidia ilmakehästä itseensä. (Pajula et al. 2018)

Kun tuotetta tarkastellaan sen koko elinkaaren ajalta, voidaan sen hiilijalanjäljestä vähentää sen positiiviset vaikutukset eli hiilikädenjälki. Näin jäljelle jäänyt kokonaishiilijalanjälki (tai -hiilikädenjälki) kuvaa realistisemmin sen koko elinkaaren aikaisia ympäristövaikutuksia.

Hiilikädenjälkeä mitataan kuvan 2 moduuleilla D1-D3. Lisäksi Co2data.fi -tietokannassa on esitetty lukuarvoja kuvasta 2 puuttuville moduuleille D4 ja D5. (co2data.fi) Tämän työn esimerkkien laskennassa on huomioitu myös juuri moduulin D4 hiilikädenjälki puulle. Muilla esimerkkimateriaaleilla hiilikädenjälkeä ei co2data.fi:n mukaan ole.

3. KIERTOTALOUSASTE

Kiertotalouden ja elinkaariajattelun perusideana on hyödyntää raaka-aineita ja tuotteita mahdollisimman pitkään säilyttäen niiden arvo. Kiertotaloutta voidaan toteuttaa eri asteilla. Ekologisin vaihtoehto on materiaalin pitäminen käytössä mahdollisimman kauan. Kun rakenne pitää kuitenkin lopulta purkaa, on kiertotalousajattelussa seuraavan asteen vaihtoehtona materiaalin uudelleenkäyttö tai jälleenmyynti. Se vaatii käytössä pitämiseen verrattuna enemmän energiaa, ja sen myötä myös päästöt lisääntyvät. Uudelleenkäytön jälkeen kolmas vaihtoehto on uudistus tai uudelleenvalmistus. Tässä materiaalia muokataan jo enemmän uutta käyttökohdetta varten, joten energian tarve lisääntyy. Viimeisenä vaihtoehtona on materiaalin kierrätys raaka-aineeksi tai komponenteiksi. Kierrätys on luonnollisesti kaatopaikkaa parempi vaihtoehto, mutta se tarkoittaa silti ensisijaisia vaihtoehtoja suurempia päästöjä, sillä materiaaleja joudutaan merkittävästi muokkaamaan ja mahdollisesti valmistamaan uudelleen. (Seppälä et al. s. 19) Kaikkia materiaaleja ei voida kuitenkaan edellä esitettyjen vaihtoehtojen mukaan uudelleen hyödyntämään tai uudelleenkäyttämään. Tällaisia materiaaleja ovat esimerkiksi vaarallisten aineiden vuoksi kaatopaikalle sijoitettavat ongelmajätteet. (Ymparisto.fi 2016)

Materiaalihäviöiden estämisen myötä myös ekologisuus yleensä paranee, koska entisten materiaalien tilalle ei tarvitse hankkia uusia. Koko elinkaaren päästöjä ja erityisesti kiertotaloutta ajatellen materiaalien tai rakenteiden säilyttäminen ja ylläpito on tyypillisesti kaikista ekologisin vaihtoehto. Toisessa ääripäässä on puolestaan vanhanaikainen lineaarinen talousmalli, jossa materiaalit hävitetään kokonaan käytön jälkeen. Siinä syntyy eniten päästöjä, koska materiaalit joudutaan tuottamaan kokonaan uudelleen. (Seppälä et al. 2016, s. 10)

Kiertotalousmalli uudelleenkäytön ja materiaalien hyödyntämisen suhteen toimii parhaiten niissä tapauksissa, joissa materiaali on teknisesti uudelleenkäytettävissä. Joissain tapauksissa joudutaan tosin hävittämään edellinen rakenne kokonaan uuden tilalta. Esimerkiksi puuta ei voida materiaalina uudelleen käyttää käytännössä ollenkaan (co2data.fi). Joskus myös kiertotalousajattelun vastaisesti on kannattavampaa purkaa ja rakentaa uusi, kuin pitkittää rakennuksen elinkaarta. Tämä pätee erityisesti vanhoille rakenteille, joiden käytön aikainen hiilijalanjälki on huomattavasti uusia suurempi. (Jäätvuori 2020)

Kiertotalousasteella tarkoitetaan uudelleen käytettyjen tai uudelleen valmistettujen materiaalien osuutta kaikesta rakenteessa käytettävästä materiaalista. Englanniksi sitä kuvataan termillä CMU eli Circular material use ratella. (Tilastokeskus 2020) Kiertotalousastetta voidaan mitata eri tasoilla, laajimmassa skaalassa ollen tyypillisesti koko valtion taso ja tarkimmassa skaalassa ainoastaan yksittäinen materiaali. Mittarin on kehittänyt Eurostat. Se kehitettiin alun perin, jotta kiertotalouden etenemisen seuranta helpottuisi. (Eurostat 2018)

3.1 Laskenta

Kiertotalousastetta voidaan mitata useilla eri tasoilla. Esimerkiksi Eurostat vertailee sitä valtioiden tasolla (Eurostat 2018, s. 19–20). Tässä työssä tarkastellaan kuitenkin pienemmän skaalan kiertotalousasteita rakennetyypeille. Laskentakaava on perustasolla sama mitattavasta kiertotalousasteesta riippumatta. Kiertotalousaste lasketaan jakamalla kierrätetyn materiaalin määrä käytetyn materiaalin kokonaismäärällä. Kierrätetyn materiaalin määrä pitää tämän työn laskennassa sisällään uudelleen käytetyn materiaalin ja uudelleenvalmistetun materiaalin määrän. Laskenta on esitetty kaavassa (1)

$$CMU = \frac{U}{M}, \tag{1}$$

jossa U on kierrätetyn materiaalin määrä ja M on käytetyn materiaalin kokonaismäärä. (Eurostat 2018, s. 6)

Materiaalin määrää on yleensä mielekkäintä vertailla massoina. Laskentakaavan tuloksissa suurempi arvo tarkoittaa suurempaa kierrätetyn materiaalin osuutta. Elinkaariajattelun kannalta optimaalisessa tilanteessa kiertotalousaste olisi 100 %, jolloin kaikki käytetystä materiaalista on saatu kierrätyksen kautta. Toteutuneet tulokset vaihtelevat kuitenkin huomattavasti eri materiaaleilla, niiden materiaaliominaisuuksista ja kierrätettävyydestä johtuen, kuten taulukon 1 esimerkeistä huomataan.

Taulukko 1. *Eri rakennusmateriaalien kiertotalousasteita (co2data.fi)*

Materiaali	Kiertotalousaste	Materiaali	Kiertotalousaste
Sahatavara	0 %	Teräsraudoite betonille	98 %
CLT-puutavara	0 %	Teräsprofiilit (palkit yms.)	98 %
C20/25 betoni	80 %	Alumiinilevyt	96 %
Betonipaalut	0 %	EPS-eriste	30 %
Kipsilevy	85 %	Mineraalivilla	0 %

Taulukosta huomataan suuria poikkeamia erilaisten materiaalien välillä. Erilaisten terästen uudelleenkäytettävyys on hyvä, ja siten myös niiden kiertotalousasteet suuria. Vastakohtana ovat puolestaan puumateriaalit, joita ei yleensä voida uudelleen käyttää ollenkaan. Ne päätyvätkin usein poltettavaksi. Betonirakenteita pystytään puolestaan paaluja lukuun ottamatta hyödyntämään uudelleen valmistuksen kautta rakennusmateriaalina. Loput 20 % hävitetään lopullisesti. (CO2data.fi)

3.2 Soveltaminen rakennetyypeille

Rakennetyypin kiertotalousastetta voidaan käyttää moneen tarkoitukseen. Projektin suunnittelun alussa voidaan vertailla rakennetyyppejä esimerkiksi koko valtion tasolla toteutuneiden kiertotalousasteiden suhteen. Tämän, ja muiden mittareiden avulla voidaan siten valita optimaalinen rakennetyyppi kohteeseen.

Vaihtoehtoisesti suunnitteluvaiheen valmistelussa voidaan asettaa tavoite tai vaatimus kiertotalousasteelle. Toteutusvaiheessa urakoitsija sitten sitoutuu kyseisen kiertotalousasteen tavoitteluun materiaalien hankinnassa. Tavoitteiden asettamisessa projektiorganisaation kannattaa perehtyä kierrätettyjen materiaalien saatavuuteen, jotta tavoitteesta saadaan tehtyä realistinen. Myös materiaalikohtaiset erot tyypillisissä kiertotalousasteen toteumissa tulee huomioida.

Vastaavasti toteutusvaiheen lopussa rakennuksen osille voidaan laskea kullekin rakennetyypille toteutunut kiertotalousaste. Tämä mahdollistaa asetettujen tavoitteiden toteuman tarkastamisen ja antaa samalla hyödyllistä dataa tulevia kohteita varten.

4. PITKÄAIKAISKESTÄVYYSINDEKSI JA MUUT MITTARIT

Rakennusprojektin suunnitteluvaiheessa halutaan usein valita mahdollisimman pitkään kestävä rakenne, joka on luotettava ja jota ei tarvitse huoltaa tai purkaa ennenaikaisesti. Pitkäikäiset rakenteet näkyvät myös elinkaaren aikaisissa huoltokustannuksissa, kun rakennetta ei tarvitse korjata merkittävästi.

Lähtökohtaisesti pitkäikäinen rakenne on hiilijalanjäljeltään paras, sillä sitä ei tarvitse purkaa tai korjata lyhytaikaisempien tavoin kovin usein. Joissain tapauksissa joudutaan kuitenkin korjaamaan erityisesti vanhoja rakenteita useaan kertaan, joka myös lisää niiden koko elinkaaren hiilijalanjälkeä. Tällaisissa tapauksissa voi joskus olla ekologisempaa purkaa vanha rakennus ja korvata se uusilla, nykyaikaisilla rakenteilla, kuten A-insinöörien selvityksestä käy ilmi. (Jäätvuori 2020)

Erilaiset materiaalit ja rakenteet kestävät rasituksia eri tavalla. Jokaisen rakennetyypin osan vertailu erikseen ei kuitenkaan ole kannattavaa, eikä välttämättä usein edes mahdollista. Siksi tarvitaan mittari, joka kuvaa ainakin suuntaa antavasti rakenteen oletettua kestävyyttä vuosissa. Tätä mittaria kutsutaan pitkäaikaiskestävyysindeksiksi.

4.1 Käyttöikä

Rakennuksen käyttöikä on suunniteltu ikä, johon rakenteen tulee vähintään päästä tavanomaisella ylläpidolla ennen sen vaurioitumista. Yleensä tilaaja asettaa vaatimuksen käyttöiälle. Rakenteiden todellisessa ennakoitavassa kestävyydessä on merkittävää hajontaa mm. vaihtelevien olosuhteiden vuoksi. Standardisoituneen käytännön mukaan tarkasteltavista rakenteista 95 % tulisi kestää suunniteltua käyttöikää pidempään. Toisin sanoen maksimissaan 5 % rakenteista saisi vaurioitua ennen määrätyn käyttöiän saavuttamista. (Elementtisuunnittelu 2020)

Kantavat rakenteet tulee aina mitoittaa kestämään vaadittu käyttöikä varmuuskertoimella huomioituna. Tätä mitoitettavaa käyttöikää kutsutaan käyttöiän laskenta-arvoksi (RIL 216-2001, s. 19). Rakenteiden todellista kestoa voidaan mallintaa logaritmisella kuvaajalla eri käyttöikien todennäköisyydestä (elementtisuunnittelu.fi 2020).

Esimerkiksi 50 vuoden käyttöiälle suunnitelluista kantavista rakenteista noin puolet kestää jopa 150 vuotta (elementtisuunnittelu.fi 2020). Tätä 150 vuoden kestoa kutsutaan käyttöiän laskenta-arvoksi (RIL 216-2001, s. 19). Käyttöiän laskenta-arvo lasketaan kaavalla

$$t_d = \gamma_t * t_g, \tag{2}$$

missä γ_t on osavarmuuskerroin ja t_g on käyttöikävaatimus.

Kantavien rakenteiden mitoitustavasta ja pitkäikäisyydestä johtuen ne harvoin ovat määräävä tekijä rakenteen kestossa. Pitkäaikaiskestävyysindeksin määrittäminen kestävimmän rakenneosan mukaan ei siksi ole kannattavaa.

4.2 Tekniset käyttöiät

Rakenteiden tekninen käyttöikä tarkoittaa aikaa, jonka ajan rakenne tai rakennusosa täyttää sille asetetut toimivuusvaatimukset. Teknisen käyttöiän päättyessä rakenne tulee pääsääntöisesti korvata uudella. Tekniset käyttöiät riippuvat myös rakenteelle määritetystä rasitusluokasta. Kevyiden olosuhteiden, eli luokan 3, ja vaikeiden olosuhteiden välillä ero on osalla rakenteista suuri. Esimerkiksi lautaverhouksen tekninen käyttöikä rasitusluokassa 3 on 70 vuotta. Rasitusluokassa 1 se on puolestaan pudonnut merkittävästi 30 vuoteen. (RT 18-10922, s. 2)

Kaikki RT 18-10922:ssa taulukoidut luvut teknisestä käyttöiästä ovat yleistäviä arvioita. Ne perustuvat oletukseen siitä, että rakenne on toteutettu rakennusajan määräysten mukaisesti ja sitä on huollettu asiaan kuuluvasti. Rakennuksen tai rakenteen toteutunut käyttöikä voikin olla sen taulukoitua käyttöikää pienempi, esimerkiksi silloin, kun ei ole noudatettu hyvää rakennustapaa, on tehty rakentamisen aikaisia virheitä tai laiminlyöty huoltotoimenpiteitä. (RT 18-10922, s. 2)

4.3 Rakenneosien erot

Rakenteiden kestävyydessä olennaista on myös niiden altistuminen rasituksille. Ulkokuoren rakenteille kohdistuu sään vaihtelun johdosta kosteusrasitusta lähes ympärivuotisesti, mikä kuluttaa myös niiden materiaaleja. Tämän johdosta niiden käyttöiätkin ovat yleensä merkittävästi pienempiä. Kantavat rakenteet ovat puolestaan yleensä hyvin suojassa kriittisiltä sään rasituksilta, jolloin niiden käyttöikäkin on pidempi. (RIL 216-2001)

Esimerkiksi Kiinteistön teknisten käyttöiät-kortista (RT 18-10922, s. 6–7) huomataan, että betonisen julkisivun tekniseksi käyttöiäksi arvioidaan 30 vuotta. Kantavien betonira-

kenteiden käyttöiät puolestaan ovat rakennuksen suunnitellun käyttöiän pituisia. Todellisuudessa kantavat rakenteet kestävät kuitenkin huomattavasti käyttöikää pidempään, suunnittelussa käytetyn varmuusmenettelyn vuoksi.

Kuten edellä on todettu, kantavat rakenteet kestävät yleensä huomattavasti asetettua käyttöikää pidempään. Tämän vuoksi rakenteita on siten mielekkäämpi vertailla niiden säälle alttiiden rakennusosien teknisten käyttöikien pohjalta. Käytännössä yleensä ratkaiseva rakenneosa pitkäaikaiskestävyyden suhteen on siis ulkoverhoilu. Teknisten käyttöikien taulukosta (RT 18-10922, s. 3-4) huomataan, että säälle altistuvien rakenteiden verhoilujen lisäksi myös maanvaraisten rakenteiden todelliset käyttöiät eivät kaikissa olosuhteissa saavuta asetettua käyttöiän vaatimusta.

4.4 Indeksin määritys

Pitkäaikaiskestävyysindeksiksi määritetään rakenteen kriittisimmän osan arvioitu tekninen käyttöikä. Yleensä ratkaiseva on siis se osa, joka on kaikista alttein säälle.

Jotta tulos kuvaisi hyvin kaikkia rasitusluokkia, määritetään pitkäaikaiskestävyysindeksi niiden keskiarvona. Indeksin yksikkönä on vuodet, [v]. Laskenta tapahtuu kaavalla

$$T_{pit.kest} = \frac{K_1+K_2+K_3}{3}, \tag{3}$$

missä K_1 on rasitusluokan 1 tekninen käyttöikä, K_2 rasitusluokan 2 tekninen käyttöikä ja K_3 rasitusluokan 3 tekninen käyttöikä.

Indeksin laskennassa on huomionarvoista, että joidenkin materiaalien kohdalla tekninen käyttöikä on rakennuksen suunnitellun käyttöiän pituinen. Tällöin myös pitkäaikaiskestävyysindeksi voi vaihdella käyttöiän mukaan, sillä keskiarvossa huomioidaan tällöin käyttöikä teknisen käyttöiän sijaan.

4.5 Huoltoväli

Huoltoväli on aikaväli, jonka jälkeen rakenteelle tehdään tarkastus- ja huoltotoimenpiteet. Huoltotoimenpiteet määritellään yleensä erillisessä huoltosuunnitelmassa. (RT 18-10922, s. 2)

Vaikka käyttöikä on pitkäaikaiskestävyyttä tarkastellessa tärkein mittari, suunnitteluvaiheen rakennevaihtoehtoja vertailtaessa kannattaa silti kiinnittää huomiota myös materiaalien huoltotarpeisiin. Huoltovälin merkitys korostuu erityisesti silloin, mikäli huoltoja joudutaan suorittamaan usein, tai ne ovat erityisen kalliita. Materiaalien huoltotarpeiden huomioiminen on tärkeää sekä taloudellisesta, että ekologisesta näkökulmasta.

Huoltojen osalta tulee myös muistaa, että ne vaikuttavat myös rakennuksen hiilijalanjälkeen. Usein huoltoa tai esimerkiksi verhouksen vaihtoa tarvitsevat rakenteet kuormittavat siten myös luonnon resursseja enemmän kuin pitkäikäiset rakenteet.

5. ESIMERKKIRAKENTEET

Työssä tutkitaan edellä kuvattuja mittareita neljän esimerkin kautta. Ensimmäinen on kevyt ulkoseinä, toinen pientalon tiiliseinä, kolmas termoranka-elementti ja neljäs betonisandwich-elementti. Esimerkkeihin valittiin ainoastaan ulkoseiniä, jotta ne ovat paremmin vertailukelpoisia keskenään. Puuseinä ja tiiliseinä ovat tyypillisesti käytössä asuinrakentamisessa, erityisesti pientaloissa. Tiiliseiniä käytetään tosin myös muissakin kohteissa. Termoranka-seinä on tyypillinen ratkaisu erityisesti teollisuusrakentamisessa. Betonisandwich-seinää esiintyy eniten toimitilarakentamisen puolella. Mittareita voi kuitenkin käyttää kaikenlaisten rakenteiden vertailuun. Kaikkien esimerkkirakenteiden suunniteltu käyttöikä olkoon 100 vuotta. Mikäli pitkäaikaiskestävyysindeksin laskennassa joku rakenne saavuttaa suunnitellun käyttöiän, sitä on merkitty lukuarvon sijaan kirjaimella R.

Hiilijalanjäljen laskenta perustuu CO2data.fi-tietokannassa listattuihin eri materiaalien hiilijalanjälkiin. Tietokannasta on valittu jokaisen materiaalin kohdalla konservatiivinen arvo. Kyseistä hiilijalanjälkeä käytetään myös rakentamisluvan hakemiseen. Se lasketaan kertomalla määritelty tyypillinen arvo elinkaaren vaiheista A1-A3 kertoimella 1.2, joka suurentaa sitä. Tiheydet on myös otettu CO2data-sivun materiaalien tiedoista. (co2data.fi)

CO2data-tietokanta näyttää lisäksi materiaalien hiilikädenjäljen elinkaarilaskennan osista D1, D2, D4 ja D5. Mahdolliset hiilikädenjäljet on huomioitu myös näiden esimerkkien laskelmissa mahdollisimman realistisen tuloksen esittämiseksi.

Materiaaleiksi on valittu mahdollisimman tavanomaiset vaihtoehdot, esim. betoniksi yleinen C25/30 ja puuksi tavallinen sahatavara. Kestävämmillä erikoismateriaaleilla hiilijalanjäljetkin olisivat tyypillisesti korkeammat.

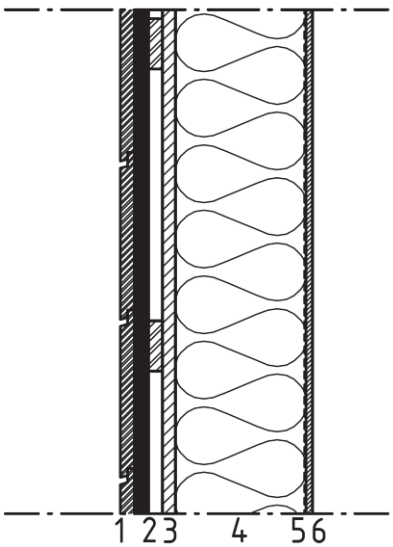
Hiilijalanjäljen tulosten suuruusluokan arvioimiseksi laskettuja arvoja on vertailtu myös One Click LCA-työkalun hiilijalanjälkien kanssa. Työkalulla voi laskea myös rakennetyypin valinnassa olennaisesti vaikuttavia elinkaaren kustannuksia ja sen sitomaa hiilidioksidia. Tässä työssä keskitytään kuitenkin hiilijalanjälkeen. One Click LCA:n tulokset on esitelty liitteen 1 taulukossa. Siinä huomionarvoisia näiden esimerkkien kannalta ovat ”Rakenne” ja ”Ilmaston lämpeneminen” -sarakkeet. Taulukossa eri rakenteiden osien arvot on esitelty sekalaisessa järjestyksessä.

Kiertotalousaste pitää aina laskea tapauskohtaisesti, sillä se riippuu todellisista toteutuneista määristä. Se riippuu pitkälti projektin vaatimuksista, sekä suunnittelijan ja urakoitsijan tekemistä ratkaisuista. Kiertotalousaste on vertailtavuuden vuoksi tässä työssä määritelty eri materiaalien tyypillisten Suomen kierrätysasteen toteumien mukaan.

Pitkäaikaiskestävyysindeksi on laskettu kappaleen 4.4 mukaisesti kaavalla (3). Eri rakennusmateriaalien tekniset käyttöiät on saatu siihen Tekniset käyttöiät kortista RT 18-10922.

5.1 Kevyt ulkoseinä

Tässä esimerkissä tutkitaan tyypillistä kevyttä ulkoseinärakennetta. Rakenne koostuu puisesta ulkoverhouksesta, koolauksista, tuulensuojalevystä, lämmöneristyksestä, kantavasta puurungosta ja sisäverhouslevystä. Lämmöneriste on mineraalivillaa ja sisäverhouslevy tavanomaista kipsilevyä. Rakennetyyppi on esitetty kuvassa 3.



1. Puuverhous 28mm
2. Ristiin koolaus 2x28mm
3. Tuulensuojalevy 28mm
4. Lämmönneristys + kantava runko C24 260x48mm k600
5. Höyrynsulku 0,3mm
6. Sisäverhouslevy (kipsi) 13mm

Kuva 3. *Esimerkki yksinkertaisesta kevyestä ulkoseinästä*

5.1.1 Hiilijalanjälki

Taulukossa 2 on laskettu kuvan 3 rakennetyypin päästöt neliötä kohti. Muokkauskertoimella huomioidaan eristekerros, jossa on mineraalivillan ohella myös puurankoja.

Taulukon pohjalta esimerkin rakennetyypille saadaan hiilijalanjäljeksi 30,02 CO2e kg/m2.

Taulukko 2. *Kevyen puuseinän hiilijalanjäljen muodostuminen kerroksittain*

Rakenneosa	Tiheys (kg/m^3)	Ympäristö-profiili (CO_2e kg/kg)	Paksuus (m)	Muok-kausker-roin	Hiilijalanjälki neliölle (CO_2e kg /m^2)
Julkisivuver-hous (puu)	480	0,09	0,028	1	1,21
Ristiin koo-laus (puu)	450	0,082	0,056	1	2,07
Tuulensuoja-levy (kipsi-levy)	800	0,35	0,028	1	7,84
Lämmöneris-tys (mineraali-villa)	40	1,5	0,26	0,92	14,35
Puurunko	450	0,082	0,26	0,08	0,77
Höyrynsulku (PE-muovi)	910	3,1	0,0003	1	0,85
Kipsiverhous	730	0,31	0,013	1	2,94
Yhteensä:					30,02

Yläpuolisessa taulukossa huomioidaan ainoastaan materiaalien hiilijalanjäljet. Vaikka ne muodostavat valtaosan rakennetyypin kokonaispäästöistä, tulisi niiden lisäksi silti huomioida rakennustyön ja kuljetuksen päästöt.

Rakenteen hiilikädenjälki puolestaan on laskettu seuraavaksi taulukossa 3. Taulukkoon on huomioitu vain edellisen rakenteen puuosat, koska ainoastaan niillä on hiilikädenjälki. Hiilikädenjälki on suuruudeltaan 1,6 kgCO_2e/kg, ja se tulee kokonaisuudessaan elinkaarilaskennan moduulin D4 mukaisesti puun kyvystä sitoa itseensä hiilidioksidia. (co2data.fi)

Taulukko 3. *Kevyen puuseinän hiilikädenjälki*

Rakenne-osa	Tiheys (kg/m^3)	Ympäristö-profiili (CO_2e kg/kg)	Paksuus (m)	Muok-kausker-roin	Hiilikäden-jälki neliölle (CO_2e kg $/m^2$)
Julkisivu-verhous (puu)	480	1,6	0,028	1	21,50
Ristiin koo-laus (puu)	450	1,6	0,056	1	40,32
Puurunko	450	1,6	0,26	0,08	14,98
Yhteensä:					76,80

Lopuksi vähennetään hiilijalanjäljestä hiilikädenjälki. Jäljelle jää hiilijalanjäljeksi 30,02 $kgCO_2e/m^2$ – 76,80 $kgCO_2e/m^2$ = -46,78 $kgCO_2e/m^2$. Negatiivinen etumerkki tarkoittaa, että lopputulos puulla on todellisuudessa hiilikädenjälki. Se siis koko elinkaarensa aikana mitattuna sitoo itseensä enemmän hiilidioksidia kuin päästää ilmakehään.

One Click LCA -työkalu ilmoittaa vastaavanlaisen puurakenteen hiilijalanjäljeksi 23 $kgCO_2e/m^2$. Työkalu ei huomioi hiilikädenjälkeä, joten se pitää vähentää tuloksesta vielä erikseen. Näin kokonaishiilijalanjäljeksi muodostuu: 23 $kgCO_2e/m^2$ – 76,80 $kgCO_2e/m^2$ = -53,8 $kgCO_2e/m^2$.

5.1.2 Kiertotalousaste

Kokonaiskiertotalousaste rakennetyypille lasketaan kaavalla (1). Laskenta tehdään yhdelle neliömetrille massan mukaan kilogrammoissa. Taulukossa 4 on esitetty kevyen puuseinän massat ja kierrätysasteet materiaaleittain (co2data.fi).

Taulukko 4. *Puuseinän kierrätysasteet ja massat neliömetriä kohti*

Rakenneosa	Tiheys [kg/m^3]	Massa [kg]	Kierrätysaste [%]	Kierrätetty osuus [kg]
Julkisivuverhous (puu)	480	13,44	0	0,00
Ristiin koolaus (puu)	450	25,20	0	0,00
Tuulensuojalevy (kipsilevy)	800	22,40	85	19,04
Lämmöneristys (mineraalivilla)	40	9,57	0	0,00
Puurunko	450	9,36	0	0,00
Höyrynsulku (PE-muovi)	910	0,27	0	0,00
Kipsiverhous	730	9,49	85	8,07
Yhteensä:		89,73		27,11

Kaavalla 1 lasketaan taulukon 4 tuloksista kiertotalousasteeksi CMU = 30,2 %.

5.1.3 Pitkäaikaiskestävyysindeksi

Rakenteen kriittisin osa on sen lautaverhous. Tuuletuksesta huolimatta verhoilu joutuu Suomen olosuhteissa kovalle säärasitukselle. Lautaverhouksen tekniset käyttöiät eri rasitusluokissa on esitelty taulukossa 5.

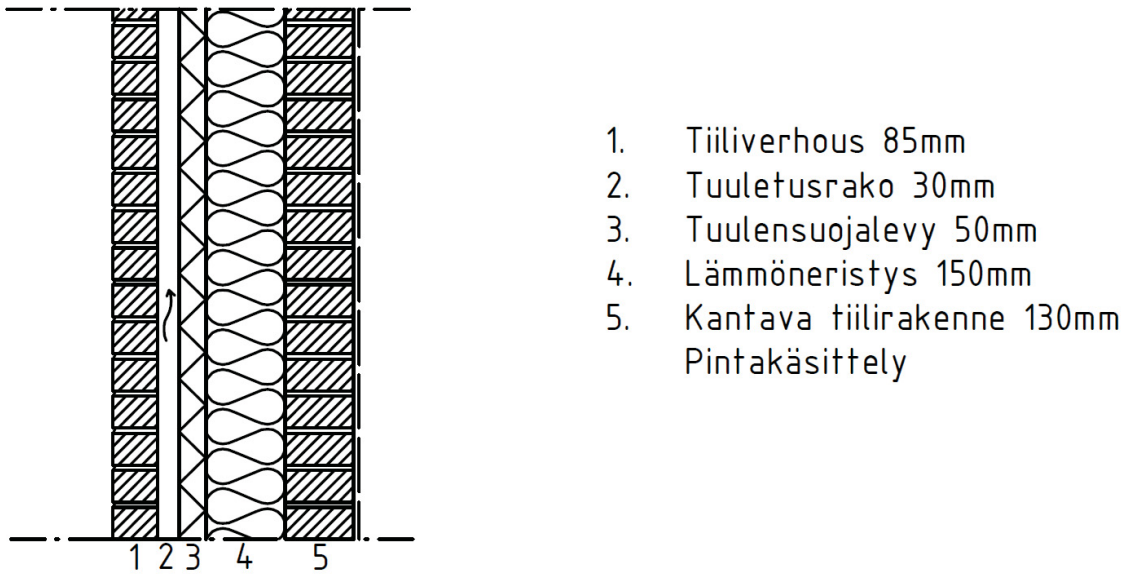
Taulukko 5. *Tekniset käyttöiät*

	Rasitusluokka 1	Rasitusluokka 2	Rasitusluokka 3
Tekninen käyttöikä	30	50	70

Taulukon 5 lukuarvoista lasketaan kaavalla 3 pitkäaikaiskestävyysindeksiksi $T_{pit.kest} = 50\ v$. Tulos vastaa tässä tapauksessa rasitusluokan 2 lukuarvoa.

5.2 Pientalon tiiliseinä

Toisena esimerkkirakenteena tutkitaan pientaloissa tyypillisesti käytettävää tiiliseinää. Rakenne koostuu tiiliverhouksesta, tuuletusraosta, tuulensuojalevystä, lämmöneristyksestä sekä paksummasta kantavasta tiilirakenteesta. Lämmöneristys on mineraalivillaa. Rakenne on esitelty tarkemmin kuvassa 4.



Kuva 4. *Esimerkki pientalon tiiliseinästä*

5.2.1 Hiilijalanjälki

Taulukossa 6 on laskettu tiiliseinärakenteen hiilijalanjälki. Laastin laskennassa määrä on karkea arvio. Muurauslaastia on suunnilleen 1/7 tiiliverhouksien osuudesta. Se on otettu huomioon muokkauskerroin-sarakkeessa.

Taulukko 6. *Kevyen puuseinän hiilijalanjäljen muodostuminen kerroksittain*

Rakenne-osa	Tiheys (kg/m^3)	Ympäristö-profiili (CO_2e kg/kg)	Paksuus (m)	Muok-kausker-roin	Hiilijalanjälki neliölle (CO_2e kg /m^2)
Tiiliver-hous	1500	0,22	0,085	6/7	24,04
Muuraus-lasti	1500	0,14	0,085	1/7	2,55
Tuuletus-rako	0	0	0,03	1	0
Tuulensuo-jalevy	800	0,35	0,05	1	14
Mineraali-villa	40	1,5	0,15	1	9,00
Kantava tii-lirakenne	1500	0,22	0,13	6/7	36,77
Muuraus-laasti	1500	0,14	0,13	1/7	3,9
Yhteensä:					90,27

Tiiliseinän hiilijalanjäljeksi muodostui 90,27 kgCO_2e/m^2. Tulos on aivan eri luokkaa kevyeen puuseinään verrattuna. One Click LCA ilmoittaa vastaavan kaltaisen rakenteen tiiliseinän hiilijalanjäljeksi 80 kgCO_2e/m^2. Tuloksissa on jonkin verran eroa, mutta suuruusluokka on sama.

5.2.2 Kiertotalousaste

Taulukossa 7 on esitetty tiiliseinän massat ja kierrätysasteet materiaaleittain. (co2data.fi) Kiertotalousaste on laskettu kaavalla (1).

Taulukko 7. *Puuseinän kierrätysasteet ja massat neliömetriä kohti*

Rakenneosa	Tiheys [kg/m³]	Massa [kg]	Kierrätysaste [%]	Kierrätetty osuus [kg]
Tiiliverhous	1500	109,29	58 %	63,39
Muurauslasti	1500	18,21	0	0,00
Tuuletusrako	0	0	0	0
Tuulensuoja-levy	800	40	0	0,00
Mineraalivilla	40	6	0	0,00
Kantava tiili-rakenne	1500	167,14	58 %	96,94
Muurauslaasti	1500	27,86	0	0
Yhteensä		368,5		160,33

Materiaaleista ainoastaan tiiltä kierrätetään. Sen osa on kuitenkin suurin osa rakenteen massasta. Kaavalla 1 lasketaan taulukon 7 tuloksista kiertotalousasteeksi CMU = 43,5 %.

5.2.3 Pitkäaikaiskestävyysindeksi

Rakenteen kriittisin osa on sen tiiliverhoilu. Tiiliverhoilun tekniset käyttöiät ovat kuitenkin muihin tämän työn rakenteisiin verrattuna huomattavasti pidempiä. Rasitusluokissa 2 ja 3 se saavuttaa rakennuksen suunnitellun käyttöiän, eli tässä esimerkissä 100 vuotta. (RT 18-10922 2008)

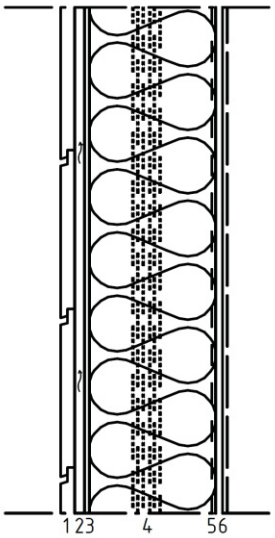
Taulukko 8. *Tekniset käyttöiät*

	Rasitusluokka 1	Rasitusluokka 2	Rasitusluokka 3
Tekninen käyt-töikä	50	100	100

Taulukon 8 lukuarvoista lasketaan kaavalla 3 pitkäaikaiskestävyysindeksiksi $T_{pit.kest} = 83\ v$. Rakenne on tämän vertailun pitkäikäisin.

5.3 Termoranka-elementtiseinä

Kolmannessa esimerkissä tarkastellaan toimitila rakentamisessa yleisesti käytettyä kevyttä termoranka ulkoseinää. Rakennetyyppi koostuu metallipaneeli-verhoilusta, hattuorsista, tuulensuojalevystä, kantavasta kuumasinkitystä teräsrangasta, mineraalivillalämmöneristeestä, höyrynsulusta ja rakennuslevystä. Rakenteen ulkoverhous voi esimerkiksi olla teräksestä valmistettuja paneeleja. Rakennetyyppi on tarkemmin esitelty kuvassa 5.



1. Metallipaneeli-verhous
2. Tuuletusväli,
   Hattuorret 20mm k600
3. Tuulensuojalevy >9mm
4. Kantava rakenne,
   kuumasinkitty teräsranka 250mm k600
   Lämmöneriste, mineraalivilla
5. Höyrynsulku, muovikalvo 0,2mm
6. Rakennnuslevy 13mm
   Seinä ja pintakäsittely

Kuva 5. *Termoranka-ulkoseinän rakennetyyppi*

5.3.1 Hiilijalanjälki

Taulukosta 9 lasketaan termoranka-seinän hiilijalanjäljeksi 63,05 CO2ekg/m^2. Lukuarvo on yli tuplasti kevyttä ulkoseinää korkeampi. Tämä on kuitenkin ymmärrettävää, koska termoranka-seinää käytetäänkin tyypillisesti vaativammissa kohteissa suurempien rasitusten alaisena.

Taulukko 9. *Termoranka-seinän hiilijalanjälki*

Rakenneosa	Tiheys [kg/m^3]	Ympäristö-profiili [CO_2e kg / kg]	Paksuus [m]	Muok-kaus-kerroin	Hiilijalanjälki [CO_2e kg / m^2]
Metallipaneeli-verhous	5,73	3,1	-	1	17,76
Hattuorret 20mm**	0,944	2,8	-	1,67	4,41
Tuulensuojalevy (kipsilevy)	800	0,35	0,028	1	7,84
Lämmöneristys (mineraalivilla)	40	1,5	0,25	1	15,00
Kuumasinkitty teräsranka**	2,85	3	-	1,67	14,25
Höyrynsulku (PE-muovi)	910	3,1	0,0003	1	0,85
Kipsiverhous	730	0,31	0,013	1	2,94
Yhteensä					63,05

One Click LCA:ssa on vastaavia teräsrakenne-esimerkkejä heikosti saatavilla. Palvelusta löytyy ainoastaan yksi teräs-sandwich -rakenne. Palvelu ilmoittaa kyseiselle rakenteelle hiilijalanjäljeksi 38 CO2e kg / m^2. Tulos on kokoluokaltaan merkittävästi erilainen taulukossa 9 lasketusta tuloksesta. Rakennetyypit eivät kuitenkaan ole kovin hyvin vertailukelpoisia niiden rakenne-eroista johtuen.

Teräsosia uudelleen käytetään suurella kiertotalousasteella (co2data.fi). Tämän johdosta myös osa niiden päästöistä voidaan vähentää hiilikädenjälkenä, sillä oletuksena kerran valmistettua metalliosaa käytetään useaan kertaan. Termoranka-seinän hiilikädenjälki on esitetty taulukossa 10.

Taulukko 10. *Kevyen puuseinän hiilikädenjälki*

Rakenne-osa	Tiheys (kg/m³)	Ympäristö-profiili (CO_2e kg/kg)	Paksuus (m)	Muok-kausker-roin	Hiilikäden-jälki neliölle (CO_2e kg /m²)
Ulkoverhous	480	-1,5	0,028	1	-20,16
Hattuorret 20mm	0,944	-1,4	-	1,67	-2,20
Kuumasin-kitty teräs-ranka	2,85	-1,3	-	1,67	-6,18
Yhteensä:					-28,54

Näin termoranka-seinän hiilijalanjäljeksi jää 63,05 kgCO_2e/m^2 – 28,54 kgCO_2e/m^2 = 34,51 kgCO_2e/m^2. Tulos on myös suht hyvin linjassa One Click LCA:n tuloksen kanssa, joka on 38 kgCO_2e/m^2.

5.3.2 Kiertotalousaste

Taulukko 11. *Termoranka-seinän materiaalien massat ja tyypilliset kierrätysasteet*

Rakenneosa	Tiheys [kg/m³]	Massa [kg]	Kierrätysaste [%]	Kierrätetty osuus [kg]
Ulkoverhous*	5,73	5,73	98	5,62
Hattuorret 20mm**	0,944	0,944	98	0,93
Tuulensuoja-levy (kipsi-levy)	800	22,4	85	19,04
Lämmöneris-tys (mineraa-livilla)	40	10	0	0,00

Kuumasin-kitty teräs-ranka**	2,85	2,85	98	2,79
Höyrynsulku (PE-muovi)	910	0,273	0	0,00
Kipsiverhous	730	9,49	85	8,07
Yhteensä		51,69		36,44

Termoranka-seinän kiertotalousasteeksi muodostuu kaavalla (1) laskien: CMU = 70,5 %. Tulos on huomattavasti pientalon esimerkkejä korkeampi.

5.3.3 Pitkäaikaiskestävyysindeksi

Rakenteen kriittisin osa on sen metallilevyverhoilu. Metallilevyverhouksen tekniset käyttöiät eri rasitusluokissa on esitelty taulukossa 12.

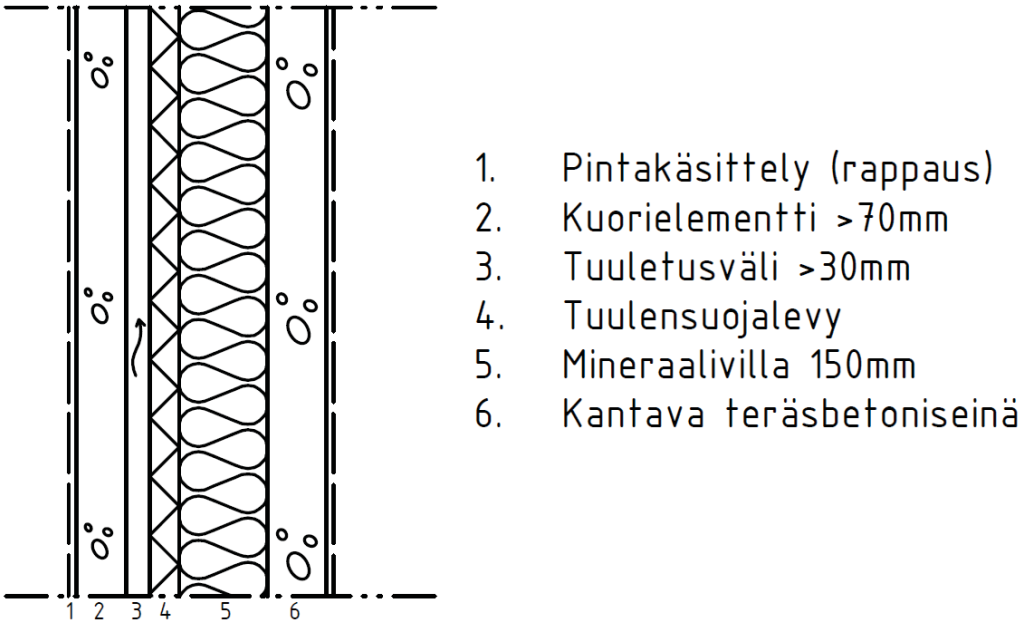
Taulukko 12. *Tekniset käyttöiät*

	Rasitusluokka 1	**Rasitusluokka 2**	**Rasitusluokka 3**
Tekninen käyt-töikä	30	40	50

Taulukon 12 lukuarvoista lasketaan kaavalla 3 pitkäaikaiskestävyysindeksiksi $T_{pit.kest} = 40\ v$. Tässäkin rakenteessa se on sama kuin rasitusluokan 2 tekninen käyttöikä.

5.4 Betonisandwich-seinä

Neljäntenä rakenteena vertaillaan betonisandwich seinää betonisella ulkokuorella. Kyseinen rakenne on yleisesti käytetty esim. asuinrakentamisessa. Rakenne koostuu pintakäsittelystä, kuorielementistä, tuuletusvälistä ja tuulensuojalevystä, mineraalivillalämpöeristeestä sekä kantavasta teräsbetoniseinästä rakenteen sisäpuolella. Pintakäsittelynä ulkopuolella voi esimerkiksi olla rappaus tai maalaus. Rakenne on tarkemmin esitelty kuvassa 6.



Kuva 6. *Teräsbetoninen sandwich-ulkoseinä*

5.4.1 Hiilijalanjälki

Taulukossa 13 on laskettu esimerkin betonisandwich-seinän hiilijalanjäljeksi 66,06 CO2e kg / m^2. Se on siis hieman korkeampi kuin termoranka-seinän hiilijalanjälki.

Taulukko 13. *Betonisandwich-seinän hiilijalanjälki*

Rakenneosa	Tiheys [kg/m^3]	Ympäristöpro-fiili [CO_2e kg / kg]	Pak-suus [m]	Muok-kaus-kerroin	Hiilijalanjälki [CO_2e kg / m^2]
Pintakäsittely / rappus	1200	2,6	0,00016	1	0,50
Kuorielementti	2400	0,089	0,085	1	18,16
Tuulensuoja-levy	800	0,35	0,028	1	7,84
Mineraalivilla	40	1,5	0,15	1	9,00

Kantava teräs-betoniseinä	2400	0,089	0,12	1	25,63
Pintäkäsittely / rappaus	1700	0,29	0,001	1	4,93
Yhteensä					66,06

One Click LCA -työkalu ilmoittaa vastaavan kaltaisen elementin hiilijalanjäljeksi 66 $kgCO_2e/m^2$. Tulos on hyvin lähellä tämän työn laskentaa. Työkalusta valittu esimerkkirakenne on kuitenkin koostumukseltaan hieman erilainen. Eristettä on rakenteessa 220 mm ja betonia 150 mm. (One Click LCA) Toisesta lähteestä saadun esimerkin kautta voidaan kuitenkin päätellä, että esimerkkirakenteen hiilijalanjäljen suuruusluokka on ainakin oikea.

5.4.2 Kiertotalousaste

Taulukko 14. *Betonisandwich seinän massat ja kierrätysasteet*

Rakenneosa	Tiheys [kg/m³]	Massa [kg]	Kierrätysaste [%]	Kierrätetty osuus [kg]
Pintakäsittely / rappaus	1200	0,192	0	0
Kuorielementti	2400	204	80	163,2
Tuulensuojalevy	800	22,4	85	19,04
Mineraalivilla	40	6	0	0
Kantava teräsbetoniseinä	2400	288	80	230,4
Pintäkäsittely / rappaus	1700	1,7	0	0
Yhteensä		520,59		412,64

Kiertotalousasteeksi saadaan kaavalla (2) CMU = 79,3 %. Se on vertailluista rakenteista korkein betonin korkean kierrätysasteen ansiosta.

5.4.3 Pitkäaikaiskestävyysindeksi

Rakenteen kriittisin osa on sen pinnoitettu betoniverhoilu. Pinnoite parantaa hieman betoniverhouksen teknisiä käyttöikiä normaaleissa ja kevyissä rasitusolosuhteissa. Pinnoitetun betoniverhouksen tekniset käyttöiät eri rasitusluokissa on esitelty taulukossa 15.

Taulukko 15. *Tekniset käyttöiät*

	Rasitusluokka 1	**Rasitusluokka 2**	**Rasitusluokka 3**
Tekninen käyttöikä	30	50	70

Taulukon 15 lukuarvoista lasketaan kaavalla 3 pitkäaikaiskestävyysindeksiksi $T_{pit.kest} = 50\ v$. Hieman yllättäen se on sama kuin kevyellä puuseinällä.

5.5 Tulosten vertailu ja virhelähteet

Taulukkoon 16 on koottu olennaiset luvut kaikista mittareista rakennetyypeittäin. Kevyt puurunko ja tiiliseinä ovat keskenään vertailtavia, sillä molempia käytetään lähinnä pientaloissa. Vastaavasti termoranka ja betonisandwich-seinä ovat toistensa kanssa vertailtavia. Niillä on samankaltaisia käyttökohteita esim. toimitilarakentamisessa.

Taulukko 16. *Eri rakennetyyppien tulosten vertailu*

Rakennetyyppi	**Hiilijalanjälki [CO_2e kg/m^2]**	**One Click LCA -vertailu [CO_2e kg/m^2]**	**Kiertotalousaste [%]**	**Pitkäaikaiskestävyysindeksi [v]**	**Huoltoväli [v]**
Kevyt puurunko	-46,78	-53,8	30,2	50	5-20
Tiiliseinä	90,27	80	43,5	83	25
Termoranka	34,51	38	70,5	40	15–20
Betonisandwich	66,06	66	79,3	50	10–20

Hiilijalanjäljen suhteen kevyt puurunko on aivan omaa luokkaansa. Se koko elinkaarensa aikana sitoo tuplasti enemmän hiilidioksidia itseensä kuin sen materiaalit ovat tuottaneet valmistusvaiheessa. Todellisuudessa kuitenkin valmistusvaiheiden ulkopuoliset elinkaaren moduulit, eli muut kuin moduulit A1-A3, kasvattaisivat puurakenteen hiilijalanjälkeä. Sen materiaalit ovat lisäksi muita vertailuseiniä heikommin kierrätettävissä ja kiertotalousaste onkin vain 30,2 %. Tästä huolimatta puurakenne on vertailluista seinistä ekologisin sen hiilikädenjäljen johdosta. Tarvittaessa se voitaisiinkin korvata useampaan kertaan muun rakennuksen elinkaaren aikana, hiilikädenjäljen pysyessä silti verrokkejaan alhaisempana. Tiiliseinän hiilijalanjälki on puolestaan merkittävästi muita seinätyyppejä suurempi. Toisaalta sen kiertotalousaste on hieman puurunkoa suurempi. Pitkäaikaiskestävyysindeksissä tiiliseinä puolestaan saavuttaa huomattavasti muita esimerkkejä paremman tuloksen. Myös tiiliseinän huoltoväli on verrokeista pisin, kevyen puurungon ollessa joukon useimmin huoltoa vaativa.

Termoranka-seinän ja betonisandwich-elementtien hiilijalanjäljet ovat keskenään suhteellisen tasaväkisiä. Metalliosien suuren kiertotalousasteen aikaansaama hiilikädenjälki pienentää kuitenkin sen hiilijalanjälkeä noin puoleen betonisandwich-seinän arvosta. Kiertotalousasteessa betoniseinä kuitenkin saavuttaa n. 9 prosenttiyksiköllä paremman tuloksen. Pitkäaikaiskestävyydessä ja huoltovälissä vertailtuna rakenteet ovat hyvin samankaltaisia.

Vertaillut rakennetyypit saivat hyvin erilaisia tuloksia mittareista. Tuloksia vertaillessa on kuitenkin olennaista muistaa, että rakenteet ovat myös tyypillisesti hyvin erilaisissa käyttökohteissa. Kevyt puurunko esimerkiksi on tyypillinen lähinnä pientaloihin, kun taas termoranka-seinät ja betonisandwich-elementit ovat yleisempiä esimerkiksi toimitilakohteissa tai isommissa asuinrakennuksissa.

Hiilijalanjäljet on laskettu ainoastaan rakennusmateriaaleille. Todellisuudessa rakennustyö lisäisi päästöjä merkittävästi, mutta niiden laskenta on hyvin tapauskohtaista, eikä vertailuarvoja ole helposti saatavilla. Hiilijalanjäljet ovat lisäksi todellisia arvojaan isompia, sillä ne on laskettu konservatiivisesti kertomalla tyypillinen jalanjäljen arvo varmuuskertoimella. Varmuuskerroin on esitelty materiaalikohtaisesti CO2data.fi-palvelussa, ja se on tyypillisesti 1.2. Varmuuskertoimen tarkoituksena on poistaa vaihtelua muuttuvista tekijöistä. Muuttuvia tekijöitä voivat olla esimerkiksi raaka-aineiden kuljetusmatkat tehtaalle, sekä tehtaan prosessin tehokkuuden ja ympäristöystävällisyyden erot.

Kiertotalousasteessa ei huomioida materiaalien kierrätystapaa. Materiaali voidaan joissain tapauksissa käyttää uudelleen sellaisenaan. Vaihtoehtoisesti sitä voidaan käyttää uudelleenvalmistuksen kautta uusissa materiaaleissa. Esimerkiksi betonin kiviainesta

voidaan kierrättää uudelleen uudessa betonissa (betoni.com). Kiertotalousastetta laskiessa ei ole huomioitu tätä eroa laskennassa, vaan sekä uudelleenkäytetyt, että uudelleenvalmistetut materiaalit on yhtäläisesti huomioitu kiertotalousasteen laskennassa.

Kuten kappaleessa 4.3 todettiin, rakenteen kokemilla rasituksilla on erittäin suuri vaikutus sen todelliseen kestävyyteen. Tämä lisää huomattavaa epätarkkuutta tämän työn teknisten käyttöikien kautta ilmoitettuihin pitkäaikaiskestävyysindeksin tuloksiin. Tuloksista tuleekin aina muistaa, että ne ovat vain suuntaa antavia, eivätkä anna rakenteen todellisesta pitkäaikaiskestävyydestä välttämättä oikeanlaista kuvaa edes silloin, kun rasitusluokka on arvioitu oikein.

6. PÄÄTELMÄT

Kaikkia tässä työssä esiteltyjä mittareita voidaan yhdessä hyödyntää rakennuksen päästöjen ja/tai kustannusten pienentämiseen jo suunnitteluvaiheen ratkaisujen avulla. Hiilijalanjälki ja kiertotalousaste ovat tavallaan kääntäen verrannollisia. Saavutettaessa rakennetyypille suuri kiertotalousaste, sen hiilijalanjälki jää pienemmäksi, kuin kiertotalousasteen ollessa pieni. Rakennetyypissä ei tällöin ole käytetty niin paljoa uusia rakennusmateriaaleja, kun on pystytty uudelleen hyödyntämään jo olemassa olevia. Optimaalisessa tilanteessahan kiertotalousaste olisi rakennetyypille 100 %. Tällöin voitaisiin ikään kuin ajatella sen materiaalien hiilijalanjäljenkin suurelta osin jakautuvan useamman rakenteen elinkaaren ajalle. Joissain tapauksissa optimaalinen 100 % kiertotalousaste ei ole realistinen vaihtoehto, eikä se edes välttämättä tarkoita pientä hiilijalanjälkeä. Esimerkiksi puuta ei voida kierrättää materiaalina käytännössä ollenkaan. Kuitenkin todellisuudessa puun hiilijalanjälki on tyypillisesti eri materiaalivaihtoehdoista selvästi paras. Kiertotalousajattelu toimiikin lähinnä niille materiaaleille, jotka ovat niiden ominaisuuksien puolesta uudelleenkäytettävissä.

Vastaavasti pitkäaikaiskestävyys ja hiilijalanjälki ovat myös kääntäen verrannollisia. Pitkäikäisten rakenteiden osia ei tarvitse merkittävästi muuttaa tai uusia sen elinkaaren aikana, jolloin päästötkin pysyvät paremmin kurissa. Pitkäaikainen rakenne ja pitkä huoltoväli eivät kuitenkaan takaa sitä, että kyseinen rakenne olisi kaikista ympäristöystävällisin valinta kohteeseen. Puun hiilijalanjälki esimerkiksi voi joissain tapauksissa olla vain murto-osan betonin vastaavasta arvosta, varsinkin mikäli huomioidaan myös puun hiilikädenjälki. Tällöin rakenne voitaisiin vaihtaa jopa useampaan kertaan hiilijalanjäljen säilyen edelleen pitkäaikaisempaa, mutta epäekologisempaa rakennetta pienempänä.

LÄHTEET

Betoni.com. Kiertotalous toimii. Saatavissa (viitattu 20.4): https://betoni.com/tietoa-betonista/perustietopaketti/ekologisuus/kierratys/

Elementtisuunnittelu (2020). Säilyvyys. Saatavissa (viitattu 8.4): https://www.elementtisuunnittelu.fi/julkisivut/rakenteellinen-toiminta/sailyvyys

Eurostat, Circular material use rate. Saatavissa (viitattu 4.3): https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-manuals-and-guidelines/-/KS-GQ-18-013

Jäätvuori L. (2020). A-insinöörit. Purkavan täydennysrakentamisen hiilijalanjälki laskettiin. Saatavissa (viitattu 24.4): https://www.ains.fi/uutiset/uudisrakentaminen-on-peruskorjausta-ilmastoystavallisempi-vaihtoehto

Pajula T. et al. Carbon Handprint Guide (2018). VTT. Saatavissa (viitattu 16.4): https://projectsites.vtt.fi/sites/handprint/www.vtt.fi/sites/handprint/PublishingImages/Carbon_Handprint_Guide.pdf

Punkki J. (2020). Rakentamisen ekologisuus. Rakennustieto. Saatavissa (Viitattu 30.1.2021): https://www.rakennustieto.fi/Downloads/RK/RK030305.pdf

Puuinfo (2020). Rakennusten hiilijalanjäljen laskenta. Saatavissa (Viitattu 13.2): https://puuinfo.fi/puutieto/ymparistovaikutukset/rakennusten-hiilijalanjaljen-laskenta/

RT 18-10922 (2008). Kiinteistön tekniset käyttöiät ja kunnossapitojaksot. Saatavissa: (viitattu 11.3) https://kortistot-rakennustieto-fi.libproxy.tuni.fi/resource/juha/content/3373#page=1

RT 82-11006. Ulkoseinärakenteita. Saatavissa (viitattu 11.3): https://kortistot.rakennustieto.fi/kortit/RT%2082-11006

Ruuska A. & Häkkinen, T. (2013). Rakennusmateriaalien ympäristövaikutukset -Taustaraportti. Saatavissa: https://www.vttresearch.com/sites/default/files/julkaisut/muut/2013/YM_Taustaraportti.pdf

Seppälä J. et al. (2016). Kiertotalous Suomessa, Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 25/2016. Saatavissa (Viitattu 2.3): https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/79586/Kiertotalous%20Suomessa.pdf?sequence=1&isAllowed=y

SFS-EN ISO 14067 (2018). Suomen standardisoimisliitto. Kasvihuonekaasut, tuotteiden hiilijalanjälki.

SFS-EN ISO 15804 (2012). Suomen standardisoimisliitto. Kestävä rakentaminen

Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry (2001). RIL 216-2001, Rakenteiden elinkaaritekniikka.

Suomen Ympäristökeskus. CO2data.fi, Rakentamisen päästötietokanta. Saatavissa (Viitattu 8.4): https://www.co2data.fi/

Tilastokeskus. Saatavissa (viitattu 2.3): http://www.stat.fi/tup/kiertotalous/kiertotalousliiketoiminnan-indikaattorit.html

Vesitaito, Mikä hiilijalanjälki? Saatavissa (Viitattu 16.2): https://vesitaito.fi/mika-hiilijalanjalki/

Ymparisto.fi (2016). Purkaminen ja lajittelu korjaushankkeessa. Saatavissa (viitattu 24.4): https://www.ymparisto.fi/fi-fi/rakentaminen/kojaustieto/taloyhtiot/Korjaushankkeet/Materiaalitehokkuus_ja_jatehuolto/Purkaminen_ja_lajittelu

Liite 1: One Click LCA tulokset

Elinkaariarviointi, EN-15978: Tuotevaihe

Rakenne	Resurssi	Käyttäjän syöte	Ilmaston lämpeneminen kg CO_2e	Happamoituminen kg SO_2e	Rehevöityminen kg PO_4e	Otsonikato kg CFC11e	Alailmakehän otsoni kg Ethenee	Total use of primary energy ex. raw materials MJ	Kommentit
Ulkoseinä, tiili-mineraalivilla-tiili	Tiili, 226x104x60, 226x85x60 mm, NF with holes & solid, RF (... ?	110 kg	1,333E1	2,076E−2	2,866E−3	1,428E−8	3,914E−3	5,136E2	Assumed 54 bricks per m2 of brick wall, adjusted for thickness of 110 mm
Ulkoseinä, tiili-mineraalivilla-tiili	Tiili, 226x104x60, 226x85x60 mm, NF with holes & solid, RF (... ?	110 kg	1,333E1	2,076E−2	2,866E−3	1,428E−8	3,914E−3	5,136E2	Assumed 54 bricks per m2 of brick wall, adjusted for thickness of 110 mm
Ulkoseinä, teräs-sandwich-mineraalivilla	Steel faced, fire proof, sandwich panels with stone wool cor... ?	1 m2	3,035E1	1,554E−1	2,247E−2	3,304E−6	1,188E−2	5,627E2	U-value = 0.18 W/m2K
Ulkoseinä, tiili-mineraalivilla-tiili	Lasivillaeristelevy, yleinen, L = 0.031 W/mK, R = 3.23 m2K/W... ?	1 m2	3,461E0	1,028E−2	1,566E−3	6,068E−7	5,355E−4	1,097E2	Incl. air gap 30 mm
Pientalon ulkoseinä, puurunko ja mineraalivilla	Kipsilevy, tavallinen, yleinen, 6.5-25 mm (0.25-0.98 in), 10... ?	1 m2	2,952E0	2,112E−2	2,259E−3	1,432E−7	8,558E−4	4,892E1	
Pientalon ulkoseinä, puurunko ja mineraalivilla	Kivivillaeristelevy, yleiset, L = 0.035 W/mK, R = 2.89 m2K/W... ?	0,89 m2	0E0	0E0	0E0	0E0	0E0	0E0	
Pientalon ulkoseinä, puurunko ja mineraalivilla	Kivivillaeristelevy, yleiset, L = 0.035 W/mK, R = 2.89 m2K/W... ?	0,92 m2	1,323E1	4,053E−2	5,377E−3	1,406E−7	1,941E−3	8,503E1	
Pientalon ulkoseinä, puurunko ja mineraalivilla	Kivivillaeristelevy, yleiset, L = 0.035 W/mK, R = 2.89 m2K/W... ?	1 m2	0E0	0E0	0E0	0E0	0E0	0E0	
Ulkoseinä, teräs-sandwich-mineraalivilla	Rakenneteräs, yleinen, 60% recycled content, I, H, U, L, an... ?	3,3 kg	6,933E0	2,617E−2	4,116E−3	5,286E−7	3,412E−3	1,2E2	Assumed span 5 m, 100 mm width, 16.7 kg/m
		Yhteensä	1,975E2	6,733E−1	1,118E−1	1,009E−5	6,092E−2	3,829E3	

Rakenne	Resurssi	Käyttäjän syöte	Ilmaston lämpeneminen kg CO_2e	Happamoituminen kg SO_2e	Rehevöityminen kg PO_4e	Otsonikato kg CFC11e	Alailmakehän otsoni kg Ethenee	Total use of primary energy ex. raw materials MJ	Kommentit
Ulkoseinä, tiili-mineraalivilla-tiili	Masonry mortar, light, 1000 kg/m3 (quick-mix)	30 kg	1,631E1	3,725E−2	3,973E−3	3,172E−9	2,414E−3	1,648E2	Assumed 10 mm joint and 0.02 m3 of dry mortar per m2 of brick wall
Ulkoseinä, tiili-mineraalivilla-tiili	Masonry mortar, light, 1000 kg/m3 (quick-mix)	30 kg	1,631E1	3,725E−2	3,973E−3	3,172E−9	2,414E−3	1,648E2	Assumed 10 mm joint and 0.02 m3 of dry mortar per m2 of brick wall
Ulkoseinä, tiili-mineraalivilla-tiili	Finishing wall mortars, French average, 3 mm, 4.2 kg/m2, Don...	1 m2	1,289E1	5,145E−2	8,391E−3	1,907E−6	7,547E−3	3,225E2	
Pientalon ulkoseinä, puurunko ja mineraalivilla	Kuivattu sahatavara kuusi- tai mäntypuusta, 474 kg/m3, moist...	0,08 m2	1,498E0	8,736E−3	2,08E−3	2,538E−7	6,24E−4	3,099E2	
Pientalon ulkoseinä, puurunko ja mineraalivilla	Kuivattu sahatavara kuusi- tai mäntypuusta, 474 kg/m3, moist...	0,11 m2	6,653E−1	3,881E−3	9,24E−4	1,127E−7	2,772E−4	1,377E2	
Ulkoseinä, tiili-mineraalivilla-tiili	Vesiohenteiset sisämaalit, 1.36 kg/L, average coverage 8-10 ...	0,13 kg	2,093E−1	2,705E−3	3,279E−4	1,845E−8	1,434E−4	3,442E0	For inner wall, average spread rate 10.15 m2/l
ParmaRappaus elementti 0,17 U-arvon eristeellä	ParmaRappaus elementti 0,17 U-arvon eristeellä , U: 0.17, La...	1 m2	6,42E1	2,3E−1	4,99E−2	2,98E−6	2,07E−2	7,68E2	98x198 mm wooden stud with 300 mm spacing
Pientalon ulkoseinä, puurunko ja mineraalivilla	Höyrynsulkumuovi, 0.20 mm, 0.2 mm (Tommen Gram)	1 m2	1,834E0	6,997E−3	6,888E−4	5,683E−8	3,483E−4	3,871E0	
		Yhteensä	1,975E2	6,733E−1	1,118E−1	1,009E−5	6,092E−2	3,829E3	

One Click LCA © and 360optimi © copyright Bionova Ltd | Version: 21.02.2021, Database version: 7.6