

Jere Kurki

MUUNTOJOUSTAVIEN VÄLI- SEINÄELEMENTTIEN KÄYTTÄMINEN TOIMITILARAKENTAMISESSA

Opinnäytetyö

Tekniikan ammattikorkeakoulututkinto

Rakennustekniikka

2022



**Kaakkois-Suomen
ammattikorkeakoulu**

Tutkintonimike	Insinööri (AMK)
Tekijä/Tekijät	Jere Kurki
Työn nimi	Muuntojoustavien väliseinäelementtien käyttäminen toimitilarakentamisessa
Toimeksiantaja	Luomoa Oy
Vuosi	Tammikuu 2022
Sivut	47 sivua, liitteitä 6 sivua
Työn ohjaaja(t)	Anu Kuusela

TIIVISTELMÄ

Opinnäytetyön tarkoituksena oli selvittää, kuinka toimeksiantajan väliseinäelementit pärjäävät vertailussa yleisesti rakentamisessa totuttuihin rakenneratkaisuihin. Opinnäytetyössä keskityttiin vertailemaan rakentamisaikataulua ja rakenneratkaisuiden ympäristövaikutuksia.

Tutkimus on muodoltaan kvantitatiivinen, tilastoihin perustava, ja se toteutettiin käyttämällä avoimissa lähteissä olevia tilastoja ja tuotearvoja. Tilastot perustuvat rakennusaikataulukirjaan ja rakentamisen päästötietokantaan. Toimeksiantajan tuotteen asennusnopeus saatiin hahmoteltua avoimella haastattelulla, joka suoritettiin tutkimuksen case-kohteessa.

Tutkimuksen case-esimerkkikohde oli ensimmäinen, joka rakennettiin 4.3 metriä korkealla rakenteella, ja asennusryhmä oli ensimmäistä kertaa asentamassa elementtejä. Siksi elementtien asennusmenekkejä- ja saavutuksia voidaan pitää toistaiseksi suuntaa antavina.

Tutkimuksen aikana esiintyi havaintoja, joista on ehdotettu parannusideoita väliseinäelementteihin ja niiden asennusaikaiseen korkojen hallintaan. Tuotteen kehittäminen on kuitenkin jatkuva prosessi, ja siksi sitä käsiteltiin tutkimuksen aikana vain pintaraapaisuna.

Kiertotaloudellisessa tarkastelussa nousi esiin havaintoja, jotka tukevat toimeksiantajan tuotteen positiivisia ympäristövaikutuksia. Väliseinäelementtien muuntojoustavuudesta johtuvien etujen osoittaminen oli odotettua hankalampaa. Tämä johtui julkisesti saatavien tilastojen puutteista, sillä ei voitu tarkastella toimitilojen vuokrauksien ja käyttötarkoitusten muutoksia.

Asiasanat: muuntojoustavuus, kvantitatiivinen, rakennusaika, kiertotalous

Degree	Bachelor of Engineering
Author (authors)	Jere Kurki
Thesis title	Usage of modular non-load bearing wall elements in business construction
Commissioned by	Luomoa Oy
Time	January 2022
Pages	47 pages, 6 pages of appendices
Supervisor	Anu Kuusela

ABSTRACT

Objective of this thesis was to compare how modular non-load bearing wall elements compare to non-load Bearing wall that are usually used in business construction. Focus of this thesis was to compare differences in building schedule and environmental impact between different non-load Bearing wall types.

Thesis was quantitative research, which was done using opensource information. Information was based on construction schedule book and Finnish emissions database of construction. Building schedule for non-load bearing wall elements was based on information given by construction workers who worked on construction site that was used as way of illustration.

Construction site that was used as way of illustration was first one were company that commissioned this thesis used wall elements that were 4.3 metres tall and workers on construction site were installing wall elements for a first time. Because of this two things construction speed that was given by workers is estimate of speed real speed that elements can be installed.

Observations that were made during the research were focused on controlling the high differences during element installation. Improving the products is always non stopping project and for that reason this thesis only loosely dealt with things that were based on product development.

Life cycle assessment that was done during this thesis supported positive environmental impacts of modular non-load bearing wall elements. Benefits of modular installation of non-load bearing wall elements were harder to prove than expected because lack of open-source information regarding typical rental length of premises.

Keywords: modular, quantitative, construction schedule, life cycle assessment

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	7
2	VÄLISEINÄRAKENTEET	7
2.1	Teräsrunkoinen väliseinä	9
2.2	Puurunkoinen väliseinä	11
3	RAKENNUSAIKATAULU	12
3.1	Case-Kohteen tiedot ja vaatimukset.....	13
3.2	Rakennusaikataulun tulokset.....	14
3.3	Analyysi ja kehitysideat	18
4	KIERTOTALOUS JA YMPÄRISTÖVAIKUTUKSET.....	19
4.1	Puun ympäristövaikutukset ja kiertotalous	20
4.2	Kipsilevyn ympäristövaikutukset ja kiertotalous.....	21
4.3	Teräksen ympäristövaikutukset ja kiertotalous	21
4.4	Eristevillojen ympäristövaikutukset ja kiertotalous.....	22
5	ELINKAARI	23
5.1	Elinkaaren laskenta	25
5.2	Tuotevaihe.....	26
5.3	Rakentamisvaihe.....	27
5.4	Käyttövaihe.....	27
5.5	Elinkaaren loppu.....	28
5.6	Elinkaaren ulkopuoliset vaikutukset.....	30
6	GWP LASKENTA	32
6.1	M88 väliseinäelementin GWP	33
6.2	Teräsrunkoisen väliseinän GWP	35
6.3	Puurunkoisen väliseinän GWP	37
6.4	GWP- ja kiertotalous tulokset.....	38
7	POHDINTA.....	43

LIITTEET

Liite 1. Rakennusaikataulun laskelman yhteenveto

Liite 2. GWP-laskelmat

Liite 3. Kuvia Case-kohteesta

KÄSITTEET

fotosynteesi	Biokemiallinen prosessi, jossa kasvi tuottaa vedestä, hiilidioksidista ja valosta happea sekä glukoosia. Kemiallinen kaava $6\text{CO}_2 + 6\text{H}_2\text{O} + \text{valoenergia} \rightarrow \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6\text{O}_2$
GWP	Global warming potential. Indikaattori, joka ilmaisee prosessin tai tuotteen kasvihuonevaikutukset.
hiilijalanjälki	Jonkin tuotteen tai prosessin tuottama ilmastokuorma, mitä ei syntyisi ilman kyseisen tuotteen taikka prosessin suorittamista.
hiilikädenjälki	Jonkin tuotteen tai prosessin ilmastohyöty, mitä ei syntyisi ilman kyseisen tuotteen tai prosessinsuorittamista
jäte	Jätelain (646/2011 5§) määrittelee jätteeksi aineen tai esineen, jonka haltija on poistanut tai aikoo poistaa käytöstä.
kiertotalous	Taloustalouden järjestelmä, jonka toiminta perustuu ympäristön kantokykyyn, pitämällä tuotteet kierrossa mahdollisimman pitkään.
palamisreaktio	Kemiallinen reaktio, jossa lämpö, palavamateriaali ja happi reagoivat keskenään ja tuottavat vettä ja hiilidioksidia. Kemiallinen kaava $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$
talo 2000	Nimikkeistö, joka on standardisoitu vastaamaan suomalaisten rakennushankkeiden erittelyä.
tth	Työntekijätunti(a)

1 JOHDANTO

Tämän tutkimuksen tarkoituksena on selvittää, kuinka modulaariset väliseinäelementit soveltuvat toimitilarakentamiseen, kun tarkastellaan elementtien asennusnopeutta ja ympäristövaikutuksia. Tavoitteena on saada käsitys toimeksiantajan väliseinäelementtien asennusnopeudesta, jotta rakennuskohdeissa urakoitsijat pystyisivät tehostamaan työmaatoimintoja. Tutkimuksessa tarkastellaan elementtien asennusnopeutta vertailemalla niitä yleisesti käytössä oleviin rakenneratkaisuihin. Kiertotaloudellisessa tarkastelussa tutkittiin väliseinäelementtien hiilijalan- ja kädenjälkeä ympäristöministeriön rakennuksen vähähiilisyden arviointimenetelmällä. Kiertotaloudellinen tutkimuskysymys oli, kuinka toimeksiantajan tuotteen elinkaari ja ympäristövaikutukset poikkeavat kilpailevista rakenneratkaisuista.

Tilajana toimi savonlinnalainen startup-yritys Luomo Oy, joka on erikoistunut muuntojoustaviin rakenneratkaisuihin ja sisärakentamiseen. Yrityksen edustajien kanssa käytiin ennen tutkimusta kehityskohteet, joihin oli tarvetta keskittyä ja tutkimuskysymykset rajattiin niiden ympärille. Tutkimuksessa oli alun perin tarkoitus tarkastella myös lomakehaastattelun avulla urakoitsijoiden ja tuotteen käyttäjien kokemuksia, mutta tutkimuskysymys rajattiin pois suppean otannan takia, sillä se olisi saattanut johtaa vääristyneisiin tuloksiin.

Tutkimuksen tuloksilla toimeksiantaja pystyy tehostamaan toimintaansa ja hyödyntämään tuloksia myös markkinoinnissa. Ympäristövaikutus- ja kiertotaloustarkastelussa havaittiin, että toimeksiantajan tuote on ympäristöystävällinen ja vastuullinen kiertotaloudellisesti. Tutkimuksen aikana vierailtiin rakennuskohteella, jota käytettiin case-esimerkkinä, ja vierailuiden tarkoitus oli tukea tutkimusta ja auttaa havaitsemaan kehityskohteita tuotteessa.

2 VÄLISEINÄRAKENTEET

Tutkimuksen case-esimerkkinä olevassa kohteessa oli väliseinärakenteille asetettu ilmanääneneristysvaatimus R'_w 48 dB. Toimeksiantaja toteutti ilmaääneneristävyys vaatimuksen asentamalla kaksi heidän omaa Modular-järjestelmänsä M88 väliseinäelementtiä vierekkäin ja jättämällä väliin ilmaaon, joka toimii kavitaatiotilana. M88-väliseinäelementissä runkona on Metsä Woodin

Kerto LVL, levytyksenä käytetään puukuitulevyä ja ääneneristeenä on kivivil-
laa. Pintamateriaalina on viilupinta, lakkapinta tai maalipinta tuotteen tilaajan
toiveiden mukaisesti. Toimeksiantajan käyttämällä puutuotteilla on PEFC-serti-
fikaatti ja FSC-sertifikaatti. PEFC-sertifikaatin omaava tuote tulee talousmet-
sästä, joka on tuotettu ekologisesti, sosiaalisti ja taloudellisesti kestävillä me-
todeilla (PEFC s.a.). FSC-sertifikaatti on 25 vuotta vanha sertifikaatti, joka
osoittaa, että puutuotteen alkuperä on jäljitettävissä koko jalostus- ja valmis-
tusketjun ajan pois lukien vähittäiskauppa ja tuotteen ostaja (Kiwa s.a.).

Kilpailevalle väliseinäratkaisulle asetettiin sama ilmaääneneristävyys R'_w 48
dB. Rakennerratkaisun valinnassa käytettiin apuna kipsilevyvalmistajan Saint-
Gobainin rakennevalitsinta. Rakennevalitsin käyttää ilmaäänieristävyyden R'_w
sijasta äänitasoerolukua $D_{nT,w}$. Yksikköerosta johtuen ennen rakennetyypin
valintaa suoritettiin yksikkömuunnos. Tampereen teknillisen yliopiston toteutta-
massa ilmanäänieristävyysluku, sekä standardisoitu ja normalisoitu äänita-
soeroluku huoneistojen välisen ilmanäänieristävyyden kuvaajina arvioitiin
standardisoidun äänitasoeroluvun $D_{nT,w}$, ilmanäänieristävyys R'_w ja normali-
soidun äänitasoeroluvun $D_{n,w}$ eroavaisuuksia (Tampereen teknillinen yliopisto
s.a.). Ilmanääneneristävyys luku R'_w kuvaa äänentehon siirtymistä tilasta toi-
seen, kun taas äänitasoeroluku $D_{nT,w}$ kuvaa äänenpainetasojen eroja tilojen
välillä (mts. 1). **Kuvassa 1** on esitetty tutkimuksen tulokset taulukkomuo-
dossa.

Mittaluku	R^2	Mittaluku	R^2	Mittaluku	R^2
R'_w	0,77	$D_{n,w}$	0,78	$D_{nT,w}$	0,83
R'_w+C	0,78	$D_{n,w}+C$	0,79	$D_{nT,w}+C$	0,84
$R'_w+C_{100-5000}$	0,77	$D_{n,w}+C_{100-5000}$	0,78	$D_{nT,w}+C_{100-5000}$	0,84
$R'_w+C_{50-3150}$	0,78	$D_{n,w}+C_{50-3150}$	0,80	$D_{nT,w}+C_{50-3150}$	0,86
$R'_w+C_{50-5000}$	0,78	$D_{n,w}+C_{50-5000}$	0,79	$D_{nT,w}+C_{50-5000}$	0,86
R'_w+C_{tr}	0,73	$D_{n,w}+C_{tr}$	0,75	$D_{nT,w}+C_{tr}$	0,82
$R'_w+C_{tr,100-5000}$	0,73	$D_{n,w}+C_{tr,100-5000}$	0,75	$D_{nT,w}+C_{tr,100-5000}$	0,82
$R'_w+C_{tr,50-3150}$	0,58	$D_{n,w}+C_{tr,50-3150}$	0,59	$D_{nT,w}+C_{tr,50-3150}$	0,70
$R'_w+C_{tr,50-5000}$	0,58	$D_{n,w}+C_{tr,50-5000}$	0,59	$D_{nT,w}+C_{tr,50-5000}$	0,70

Kuva 1. asumismelun ja eri mittalukujen välisten korrelaatioiden keskiarvot (Tampereen teknil-
linen yliopisto s.a.)

Laskemalla ilmaääneneristävyyden R'_w R^2 -arvoista keskiarvo saadaan arvoksi
0,72. Äänitasoeroluvun $D_{nT,w}$ R^2 -arvojen keskiarvoksi saadaan 0,81. Tampe-
reen teknillisen yliopiston kokeissa todettiin, että $D_{nT,w}$ korreloi paremmin teo-
rian kanssa kuin R'_w (Tampereen teknillinen yliopisto s.a. 3–4). Tästä johtuen
tarkastellaan äänitasoeroluvun $D_{nT,w}$ suhdetta ilmanäänieristävyyteen R'_w .

Suhdeluku saadaan yhtälöstä (1.).

$$\frac{D_{nT,w}}{R'_w} = k \quad (1)$$

jossa	$D_{nT,w}$	Äänitasoeroluku
	R'_w	Ilmanääneneristävyys
	k	Suhdeluku

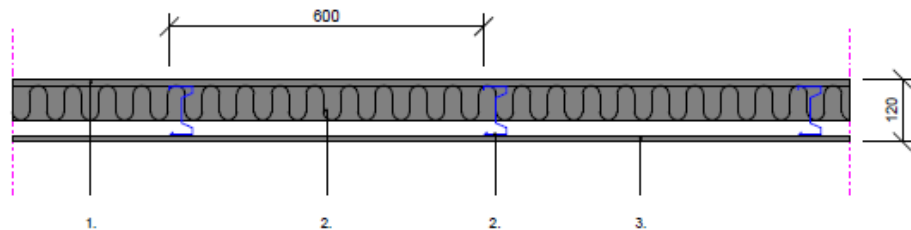
Laskemalla äänitasoeroluvun $D_{nT,w}$ keskiarvon ja ilmanääneneristävyysluvun R'_w keskiarvojen suhde yhtälöllä yksi saadaan suhdeluvuksi $k=1,12$. Ilmanääneneristävyysluku R'_w 48 dB muutetaan äänitasoeroluvuksi jakamalla R'_w suhdeluvulla k, eli $48 \text{ dB}/1,12=42,85 \text{ dB}$. Valitaan Saint-Gobainin rakennevalitsimesta äänitasoeroluvun 42,85 dB pyöristetty lähin valitsimen antama arvo 44 dB asetetaan kilpailevilla väliseinäratkaisuille äänitasoeroluvun $D_{nT,w}$ kriteeriksi 44 dB. Rakennetyypit valittiin Saint-Gobainin rakennevalitsimesta, koska se on avoin tietokanta, jota ylläpitää valmistaja, jonka tuotteita on yleisesti käytössä seinärakenteissa.

2.1 Teräsrunkoinen väliseinä

Saint-Gobainin rakennevalitsinlaskurissa on tarkasteluhetkellä 25.11.2021 kolmekymmentäkuusi (36) erilaista teräsrunkoista väliseinäratkaisua, jotka täyttävät akustiikassa asetetut kriteerit eli $D_{nT,w}$ 44dB. Opinnäytetyön yksi tutkimuskysymyksistä on seuraava: Kuinka toimeksiantajan Modular tuotteen hiilijalanjälki GWP-valmistus (Global warming potential) (A1-A3) ja hiilikädenjälki D eroaa kilpailevista rakenneratkaisuista. GWP-laskenta selostetaan tässä tutkimuksessa luvussa 4. Rakenteellisesti kaikki rakennevalitsimen väliseinäratkaisut ovat hyväksyttäviä, suurimmat erot ovat paloluokituksessa. Toimitilan muutostyölle ei ollut asetettu paloluokan suhteen vaatimuksia, koska toiminta on saman palo-osaston. Siksi rakennevalitsimen listalta jätettiin valitsematta EI60-, EI90- ja EI120 luokkien seinät, koska korkeammissa paloluokissa kipsilevytykseltä vaaditaan paljon massaa, joka heikentää rakenneratkaisun GWP-arvoa. Jäljelle jäävien kahdeksan (8) väliseinäratkaisun väliltä valittiin rakenneratkaisu, jonka GWP oli Saint-Gobainin ilmoituksen mukaisesti kaikkein pie-

nin tarkasteluhetkellä. Näin saatiin vertailtavaksi rakenneratkaisuksi mahdollisimman kilpailukykyinen väliseinäratkaisu, kun tarkastellaan väliseinien GWP-arvoja.

Tarkastelun jälkeen valittiin rakennevalitsimesta tuotenimellä Gyproc XR 95/95 (600) H-H M66 oleva väliseinäratkaisu. Väliseinäratkaisun maksimikorkeus ilman paloluokitusta on 6000 mm. Rakenteeltaan väliseinä on yksinkertainen molemmin puolin Gyproc GH 13 Habito levyillä levytetty. Runkona on Gyproc XR 95 k600, ylä- ja alaprofiilina toimii Gyproc AC 95/60 ACOUnomic teräsprofiili. Väliseinäratkaisussa on Isover Acoustic 66 mm eristevillalevy. Tuotevalmistaja Saint-Gobain ilmoittaa rakennetyypille Gwp-arvoksi 10,91 kgCO₂e/m², äänitasoeroluvuksi D_{nT,w} 44DB ja hintaindeksiksi 153 euroa/m². Seinätyypin ID on rakennevalitsimessa 37.



RAKENNEOSAT:

1. 12.5 mm	Gyproc GH 13 Habito
2. 95 mm	Ranka Gyproc XR 95 k600 + Alareunaprofiili Gyproc AC 95/60 ACOUnomic + Yläreunaprofiili Gyproc AC 95/60 ACOUnomic + Isover Acoustic 66mm
3. 12.5 mm	Gyproc GH 13 Habito

LUOKITUKSET

Järjestelmä ID	3.1.1:104
Seinän maksimikorkeus	6000 mm (ilman palovaatimusta)
Paloluokka	EI 30 (seinän maksimikorkeus 4000 mm)
Äänitasoeroluku	44 dB
GWP, valmistus	10.91 kg CO ₂ e/m ² (A1-A3)
Seinän paksuus	120 mm

Kuva 2 Valittu teräsrunkoinen väliseinärakenne (Gyproc, s.a. Väliseinävalitsin.)

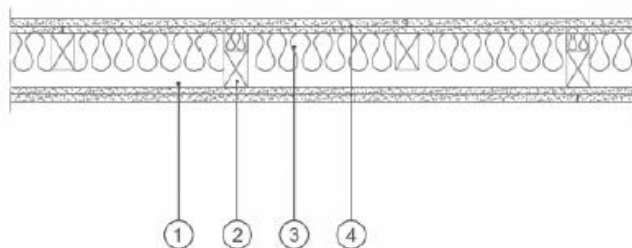
Yllä olevassa kuvassa on esitetty valitun väliseinärakenteen rakennetyyppi, niin kuin se on tuotevalmistajan sivuilla.

2.2 Puurunkoinen väliseinä

Saint-Gobainin rakennevalitsin ei tarjoa suoraan puurunkoisia väliseinärakenteita, joten puurunkoisen väliseinän valitsemisessa käytettiin Saint-Gobainin rakennekirjastoa. Puurunkoisille väliseinille oli olemassa huomattavasti vähemmän rakenteita kuin teräsrunkoisille, joten valintaprosessi oli suoraviivaisempi. Tuotekirjasto käyttää myös äänitasoerolukua $D_{nT,w}$ akustisena yksikönä. Tuotekirjastossa ei ollut tarkastelu hetkellä yhtään $D_{nT,w}$ 44 dB rakennetta, joten valittiin $D_{nT,w}$ 48 dB -luokan väliseinäratkaisu. Tuotekirjastossa oli vain yksi $D_{nT,w}$ 48 dB väliseinärakenne, joten valinta kohdistui siihen.

Valitun väliseinän tekninen nimi oli Gyproc GT 95/66 (600) NN-NN M70. Väliseinässä ala- ja yläohjauspuuksi oli suositeltu vähintään 35x95 mm profiilin puutavaraa, runkopuuksi 45x66 viilupuuta eli LVL, ääneneristeeksi Isover KL 37 70 mm ja levytyksenä käytetään kaksinkertaista 12,5 mm paksua Gyproc GN 13 kipsilevyä. Rakenteen hintaindeksiksi on ilmoitettu 190 €/m². Väliseinärakenteen Gwp-arvoa ei ilmoitettu rakennekirjastossa. Paloteknisiltä ominaisuuksiltaan väliseinärakenne on EI60/REI 30.

Gyproc GT 95/66 (600) NN-NN M70



-
1. Ohjauspuu väh. 35 x 95 mm
 2. Puuranka väh. 45 x 66 mm, k 600 mm
 3. Mineraalivilla Isover KL 37 70 mm
 4. Kipsilevyt 2 x 12,5 mm Gyproc GN 13 Normaali

Kuva 3 Valittu puurunkoinen väliseinä (Saint-Gobain s.a. Väliseinävalitsin)

Yllä olevassa kuvassa on esitetty puurunkoisen väliseinän vaakapoikkileikkaus.

3 RAKENNUSAIKATAULU

Tutkimuksessa laskettiin rakennusaikataulu puurunkoisille ja metallirunkoiselle kipsilevytetylle seinälle ja luotiin työmenekit toimeksiantajan tuotteiden asennusnopeuksista, jotta urakoitsijat pystyvät vertailemaan työsaavutuksia ja nopeutta, sekä rytmittämään työmaata. Tarkoituksena oli luoda tapa mitata ja tehostaa väliseinäelementtien asennusnopeutta toimitilarakentamisessa ja oikea-aikaistaa työtehtäviä käyttämällä perinteisiä rakennusmenetelmiä hahmotusapuna työsaavutuksista- ja menekeistä.

Rakennusaikataulua luotaessa otetaan huomioon työryhmän koko, työn määrä ja mahdolliset työtä nopeuttavat tai hidastavat tekijät, esimerkiksi suuret työmäärät, jotka nopeuttavat työtä. Työmenekit ilmoitetaan tehollisena aikana (T3) ja kokonaisaikana (T4). Tehollinen aika eli työvuoroaika (T3) on tavoitteellinen työmenekki, joka ei sisällä yli tunnin mittaisia häiriöitä tai keskeytyksiä (Rakennustieto 2019, 8). T3-aikaa käytetään, kun luodaan rakentamisvaihe aikatauluja, viikko aikatauluja ja tehtäväsuunnitelmia (mts. 8). TL3-lisäaikakerroin on työkohtainen lisäaikakerroin, joka pitää sisällään mahdollisista työnkeskeytyksistä johtuvat viivästykset, ja se on kokoluokkaa 1.1–1.3 (mts. 8). Kokonaisaika (T4) sisältää kaikki tunnit, jotka käytetään työhön ja myös tunnin taikka sitä pidemmät keskeytykset (mts. 8). T4-aika saadaan määritettyä yhtälöstä (2).

$$T3 * TL3 = T4 \quad (2)$$

jossa	T3	Tehollinen työaika	(tth)
	TL3	Työvaiheen lisäkerroin	
	T4	Kokonaisaika	(tth)

T3-työaikaa voidaan korjata suoritemääräkertoimella, ja sen käytön kriteerit ilmoitetaan rakennustöiden menekit 2020-kirjassa kunkin työtehtävän kohdalla. Esimerkiksi kuvassa 4 on ilmoitettu suoritemääräkertoimet ja niiden kriteerit väliseinätöille uudiskohteessa.

Väliseinätyön suoritemäärä					
m ²	50	100	500	1000	1500
kerroin	1,15	1,10	1,00	0,95	0,90

Kuva 4 Väliseinän suoritemääräkerroin (Rakennustieto 2020. 101)

Työsaavutus on valmis työmäärä, jonka työryhmä saa tehtyä yhdessä työvuo-rossa. Työvuoron pituus on 8-tuntia, ja työryhmän koko vaihtelee työtehtävän mukaan, riippuen työtehtävästä. Työsaavutus saadaan yhtälöstä 3

$$\frac{tth}{\text{työmenekki}} = \text{työsaavutus} \quad (3)$$

jossa	tth	työntekijätunti/työvuoro
	työmenekki	työn määrä
	työsaavutus	työryhmän työsaavutus

3.1 Case-kohteen tiedot ja vaatimukset

Case-kohteena oli toimitila, joka oli alun perin suunniteltu huonekalutehtaaksi, mutta toiminnan muuttuessa osa tehtaan tiloista muutettiin toimistokäyttöön. Kohde sijaitsi tilassa, jossa huonekorkeus oli 4,3 metriä eli huomattavasti korkeampi kuin normaali huonekorkeus, joka on yleensä 2,4–2,6 m. Huonekorkeudesta johtuen urakoitsijat joutuivat käyttämään henkilönostimia, jotka hidastivat asennusta. Kohteessa tarvikkeiden siirrot suoritettiin käsin ja siirtomatka lastauslaiturilta asennuspaikalle oli noin 200 m sisätiloissa. Tilaaja oli asettanut kohteen ilmaääneneristävyydelle Rw 48 dB, ja siksi kohteen talotekniikan läpivientien tiivistäminen toimistonosastojen välillä oli tärkeää.

Toimitilaan rakennettiin noin 670 m² valmista väliseinää. Väliseinistä 150 m² oli lasitettua väliseinää, ja oviaukkoja väliseinissä oli yhteensä viisitoista. Modular-järjestelmän väliseiniä asennettiin 1340 m², koska akustisten vaatimusten takia väliseinät toteutettiin kaksinkertaisella elementillä, jonka väliin jätettiin kavitaatiotilana toimiva ilmarako. Elementtien asennusryhmä oli kohteessa asentamassa Modular-järjestelmän tuotteita ensimmäistä kertaa, joka heikensi työn tuottavuutta. Tuottavuudelliset haasteet johtuivat asennusryhmälle uudesta rakentamistavasta ja elementtien koosta. Tutkimuksen kannalta oli

hyvä, että asennusryhmä koostui ensikertalaisista, koska se antaa realistisen kuvan nopeudessa asentaessa uutta väliseinätyyppiä. Modular-järjestelmän alakattoelementtejä asennettiin kohteeseen vain 17 m², ja työmäärä oli pieni. Siksi alakattoelementtien ja vastaavien rakenteiden asennusnopeutta ei tarkasteltu tässä tutkimuksessa.

Kohde oli elementtirakentamista ajatellen haastava johtuen toimitilan korkeudesta. Elementtejä ei voitu kuljettaa rakennuskohteelle täyskorkeana, sillä sisätilat olivat kapea. Tämä olisi estänyt elementtien siirtämisen kohteeseen. Elementit kuljetettiin kohteelle kahdessa osassa, jotka liitettiin rakentamispaikalla toisiinsa. Tämän jälkeen ne nostettiin paikalleen. Lattian epätasaisuus tuotti myös haasteita, koska elementtien alapäähän jouduttiin useasti laittamaan elementtien asennuspaloja eli korkolappuja, joilla säädettiin lattian vinoudesta johtuneet korkeusaseman heitot. Vastaavasti kohteessa välipohjana toimi ontelolaattakenttä, joka ei myöskään ollut täysin tasainen, joten elementtien yläpäähän jouduttiin useasti tekemään hienosäätöä asennuspaloilla. Talotekniikkaurakoitsija oli myös ehtinyt asentamaan katossa kulkevat iv-putket ja sähkökourut paikalleen, ja ne haittasivat elementtien asentamista. Kaikki kohteessa työtä hidastavat tekijät on huomioitu laskennassa rasitteina.

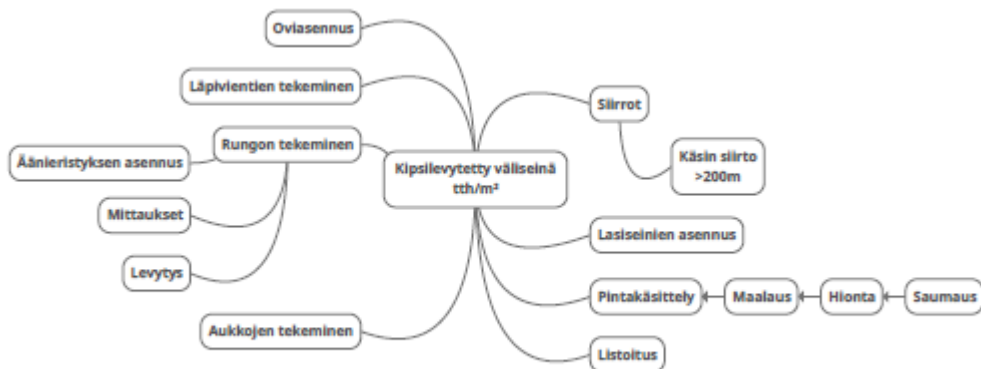
3.2 Rakennusaikataulun tulokset

Tutkimuksessa tulokset esitetään muodossa tth / seinäneliö, eli väliseinäraakenne, joka on pintakäsitelty ja rakenteellisesti valmis luovutustarkastukseen. Yksiköksi valittiin tth / seinäneliö, koska tarkoituksena on esittää tulokset muodossa, jonka avulla urakoitsijat osaavat arvioida, kuinka paljon henkilöstöresursseja vaaditaan kohteen elementtien asentamiseen. Työntekijätunnit esitetään T4-aikoina, koska Case kohteesta oli saatavana vain asennuksiin kulunut kokonaisaika. Työvaiheet perinteisen kipsilevyväliseinän ja Modular M88 väliseinäelementin välillä eroavat paljon toisistaan. Valmiin väliseinän päätyövaiheet on esitetty kuvissa viisi ja kuusi.



Kuva 5 Modular M88 -väliseinäelementin päätyövaiheet

Kuvista 5 ja 6 voidaan havaita, että osa työvaiheista on yhteisiä rakenneratkaisujen välillä, kuten siirrot, oviasennus ja mittaukset. Suurimpia eroja rakenneratkaisujen välillä on työmaalla tehtävä pintakäsittely ja listoitus. Modular-järjestelmän tuotteet on suunniteltu asennettavaksi ilman listoitusta, ja siksi työmaalistoitusta ei tehdä. Väliseinäelementit tulevat rakennuspaikalle valmiiksi pintakäsiteltynä tilaajan toiveiden mukaisesti.



Kuva 6 Kipsilevytetyn väliseinän päätyövaiheet

Luovutuskelpoista metallirungolla toteutettua väliseinäneliömetriä kohden tulisi varata noin 1,64 tth. Aika sisältää siirrot, runko- ja levytystyöt, pintakäsittelyn ja väli- ja loppusiivoukset. Kun otetaan huomioon urakkaan kuuluneet lasitetujen väliseinien, ovien ja rakennustavalle tyypillisten listoituksien tekemiset luovutuskelpoisen väliseinäneliömetrin tekemiseen kuluu noin 3,41 tth. Aika 3.41 tth/m² pitää sisällään kaikki valmistelevat, suorittavat ja lopettavat työt korjauskohteessa. Työryhmänä on käytetty kahta rakennusammattilaista kaikissa muissa työtehtävissä paitsi oviasennuksessa ja listoituksessa, joissa ryhmän koko oli yksi rakennusammattilainen.

Luovutuskelpoisen puurunkoisen väliseinän ajalliset vaatimukset neliometriä kohden olivat väliseinätöille melkein identtiset verrattuna metallirunkoiseen rakenneratkaisuun. Runko- ja levytystöihin kuluu laskennallisesti 1,85 tth/m² ja luovutuskelpoiseen kokonaisuuteen noin 3,57 tth/m². Rakennusajallisesti puurunkoinen väliseinä oli kaksinkertaisen levytyksen vuoksi hitain toteutustapa. Työryhmänä on käytetty kahta rakennusammattilaista kaikissa muissa työtehtävissä, paitsi oviaisennuksessa ja listoituksessa.

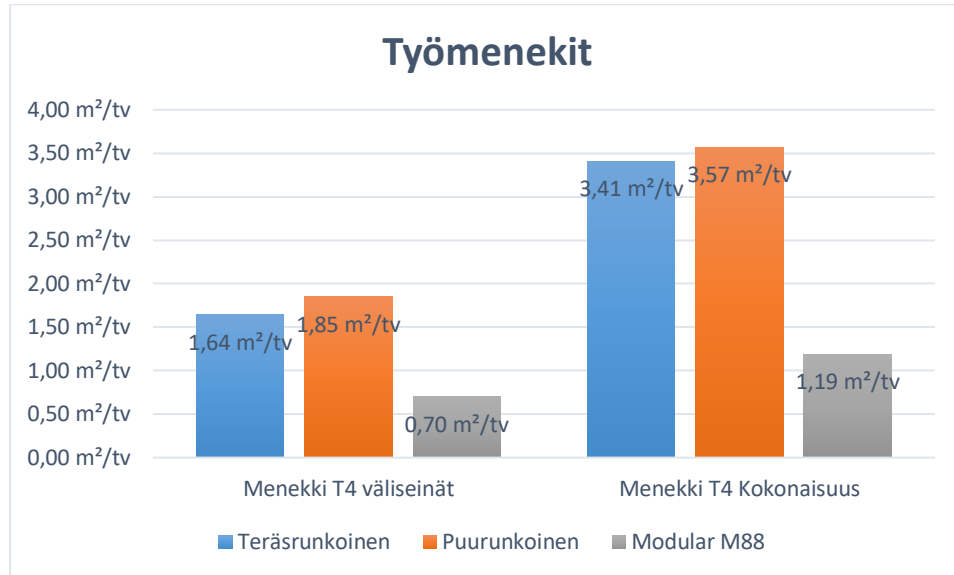
Modular M88 -väliseinäelementeillä toteutettujen väliseinien työajallinen vaatimus oli 0,7 tth/m² eli ajallisesti nopein tutkimuksen alaisena olleista rakenneratkaisuista. Aika sisältää elementtien asennuskiskot ja elementtien asennukset kaikkine siirtoineen ja siivouksineen. Valmiin väliseinäkokonaisuuden ajallinen vaatimus oli case-kohteessa keskimäärin 1,19 tth/m². Työryhmän koko oli kolme rakennusammattilaista elementtien asentamisessa pois lukien lasiseinät, jossa oli kaksi rakennusammattilaista, kaksi rakennusammattilaista asennuskiskojen asentamisessa ja yksi oviaisennuksissa. Tulee kuitenkin huomioida, että työsaavutuksia ei voida pitää täysin tarkkoina, koska työsaavutukset ja ryhmäkoot on saatu avoimella haastattelulla elementtien asennusurakoitsijan työntekijöiltä.

Ajalliset vaatimukset ovat suuntaa antavia ja perustuvat kokonaan saatuun tietoon, mutta niitä voidaan käyttää avustamaan tulevien rakennushankkeiden aikataulutuksessa. Tulee myös huomioida, että kohteeseen tuli kaksinkertaiset elementit, joten jos rakenne toteutetaan tulevissa kohteissa yhdellä elementillä työmenekki ja -saavutus tulevat olemaan noin kaksi kertaa nopeampia.

Taulukko 1 Työmenekit ja saavutukset (Jere Kurki 2020)

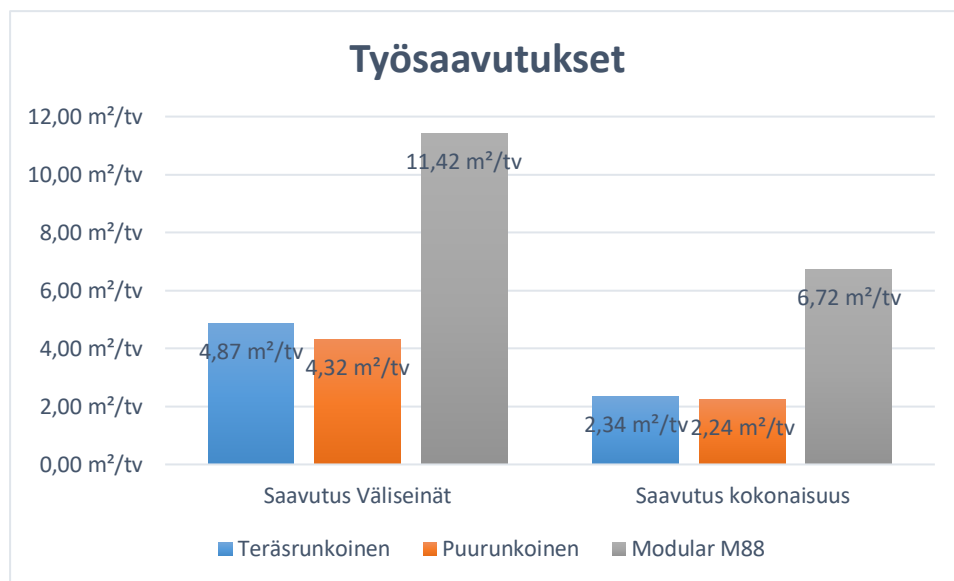
Rakenne	Menekki T4 väliseinät	Menekki T4 kokonaisuus	Saavutus Väliseinät T4	Saavutus kokonaisuus T4
Teräsrunkoinen	1,64 tth/m ²	3,41 tth/m ²	4,87 m ² /tv	2,34 m ² /tv
Puurunkoinen	1,85 tth/m ²	3,57 tth/m ²	4,32 m ² /tv	2,24 m ² /tv
Modular M88	0,7 tth/m ²	1,19 tth/m ² .	11,42 m ² /tv	6,72 m ² /tv

Taulukossa 1 esitetyillä arvoilla pystytään vertailemaan rakenneratkaisujen ajallisia eroja ja voidaan havaita, että Modular M88 -väliseinäelementillä toteutetaan luovutuskelpoista seinää noin kolmekertaanopeammin, kuin kilpailevilla rakenneratkaisuilla.



Kuva 7 Työmenekit

Kuvassa seitsemän on esitetty väliseinärakenteiden työmenekit, jotka on esitetty myös taulukossa 1.



Kuva 8 Työsaavutukset

Kuvassa kahdeksan on havaittavissa, kuinka paljon suurempi työsaavutus saadaan työvuorossa, kun käytetään elementti rakentamista. Saavutus on noin 2.5 kertaa enemmän kuin kilpailevilla rakenneratkaisuilla.

3.3 Analyysi ja kehitysideat

Tutkimuksen tarkoitus oli analysoida, kuinka Modular M88 -väliseinäelementti pärjää rakennusajallisesti kilpailevien rakennusaikataulujen kanssa. Case-Kohteessa väliseinäelementeillä toteutettu rakenneratkaisu oli työmaa-ajallisesti nopein. Elementtien asennusnopeutta haittasi lattian ja välipohjan korkoerot, joiden takia työt hidastuivat kohteessa huomattavasti. Korkeerojen hallintaan tulisi toimeksiantajan kehittää työohje taikka muokata elementtejä hieman, jotta niistä saataisiin täysi potentiaali irti. Kuvassa 9 nähdään asennettu elementti, sekä elementtirakentamisen haasteet eli katossa kulkeva tekniikka, sekä suuret kantavat rakenteet.



Kuva 9 Elementti asennettuna paikalleen

Elementtien asennusryhmän töitä hidasti myös elementtien pystysuuntainen liittäminen toisiinsa asennuspaikalla, mutta asiaan ei voitu vaikuttaa johtuen

rakennuspaikan sisätilojen kokorajoitteista. Elementtien kokoluokasta 1.2 m x 4,3 m koitui asentajille haasteita, joiden takia asentamiseen vaadittiin kokoaikaisesti kolmas rakennusammattilainen. Elementtien koon tuoma suurin haaste oli niiden paino ja korkeuden takia piti yhden asentajan olla henkilönosturilla ohjaamassa elementtiä yläohjauskiskoon, kun samaan aikaan kaksi asentajaa nosti elementtejä käsin. Kokonaisuutena Modular -väliseinäelementti on rakennusajallisesti nopea ratkaisu, joka vaatii vielä hieman hienosäätöä saavuttaakseen täyden potentiaalinsa.

4 KIERTOTALOUS JA YMPÄRISTÖVAIKUTUKSET

Rakennettu ympäristö kattaa 60 % Suomenenergian kulutuksesta, kun mukaan otetaan liikenteen aiheuttamat päästöt (Rakennusteollisuus s.a.). Rakentamisen ja rakentamisessa käytettävien osuus rakennuksen elinkaaren päästöistä on noin 20 % (mt.). Rakennusmateriaalien valinnassa on syytä tarkastella, kuinka niiden elinkaaret eroavat toisistaan ja millaiset ympäristövaikutukset niillä on.

Suomenympäristökeskus (SYKE) ylläpitää ympäristöministeriön toimeksianosta rakentamisen päästötietokantaa (co2data.fi s.a.). Opinnäytetyössä päästölaskelmien arvot perustuvat rakentamisen päästötietokannan arvoihin, kertoimiin ja materiaalien massoihin. Rakentamisen päästötietokanta valittiin tutkimuksen lähteeksi, koska se on avoin tietokanta, jota kehitetään jatkuvasti. Sieltä kaikki voivat hakea vastaavat tiedot yleisimmille rakennusmateriaaleille. Euroopassa on käytössä vastaavanlainen tietokanta Ökobaudat Sustainable Construction Information portal, jonka pitäjänä toimii Saksan Federal Ministry of the Interior, Building and Community (Ökobaudat). Rakentamisen päästötietokanta valittiin tutkimuksen lähdemateriaaliksi Ökobaudatin sijasta, koska Rakentamisen päästötietokannasta löytyvät kotimaassa valmistetuista tuotteista tiedot ja tutkimukset.

Suomi on sitoutunut EU:n jäsenvaltiona hyödyntämään 70 % rakennus- ja purkujätteestä vuoteen 2020 mennessä, mutta toteuma on edelleen 60 % (Ympäristöministeriö, s.a.). Rakennukset, ovat energia- ja materiaalipankkeja. Rakennusten materiaalit tulisi ohjata energiatuotantoon vain, jos ne ovat oleelli-

sesti vioittuneita taikka olemassa olevilla metodeilla niitä ei pystytä kierrättämään. 85 % rakentamisesta syntyvistä jätteistä syntyy korjaus tai purkukoh-teista ja vain 15 % uudisrakentamisesta (mt.). Rakennusprojektin alkuvai-heessa tulisi huomioida valittavien materiaalien käyttöikä, jotta rakennuksen elinkaaren aikana materiaalivaihtoja tulisi mahdollisimman vähän. Pitkällä käyttöiällä varustetuilla materiaaleilla elinkaari on pidempi kuin lyhyellä käyt-töiällä varustetulla.

4.1 Puun ympäristövaikutukset ja kiertotalous

Puun käyttäminen rakentamisessa on tehokas tapa edistää Suomen kansal-lista energia- ja ilmastostrategiaa ja edesauttaa tehokkaasti asetettujen ilmas-totavoitteiden saavuttamista vuoteen 2035 mennessä (Ympäristöministeriö s.a.). Puu sitoo kasvaessaan ilmassa olevaa hiilidioksidia fotosynteesin kautta ja varastoi hiilidioksidin itseensä ja muuttaa sen omaan kasvuun sopivaksi runkoaineeksi (Puuinfo, 2020a). Puuhun sitoutuu puun kasvaessa kaksi ker-taa puun omanpainon verran hiilidioksidia CO₂ (Puuinfo 2019). Puuhun sitou-tunut hiilidioksidi varastoituu puutuotteeseen tuotteen kokoeliniäksi ja vasta loppukäsittelyssä siihen sitoutunut hiilidioksidi vapautuu palamisreaktion kautta takaisin ilmakehään.

Puuinfor tuottaman aineiston mukaan (2020 c) tuotteiden ja materiaalien käyt-täminen tuottaa enemmän energiaa, kuin mitä niiden valmistus vaatii. Puutuot-teiden valmistuksen vaatima energia saadaan yleensä puun ”hukkaosista” ku-ten kuoresta. Puu on uusiutuva luonnonvara ja metsähoidollisista syistä suo-men puuvarat lisääntyvät 60 prosentilla 70 vuoden aikana (Puuinfo 2020b).

Puutuotteiden kierrätys on teoreettisesti yksinkertaista, mutta suurin ongelma tällä hetkellä on markkinoiden tila, koska markkinoilla ei tunnu olevan kysyn-tää kiertotaloustuotteille (Puuteollisuus 2021). Toinen ongelma on rakennus-materiaaleille asetetut tarkat vaatimukset, kuten CE-merkintä kantaville raken-teille (mt.). Kotitaloudet kierrättävät puutuotteita yleisesti ja tyypillisiä kierrätys-tuotteita on erilaiset rakennuslevyt (mt.). Kierrätetyt puutuotteet murskataan, puhdistetaan ja liimataan lopulta levyksi (mt.). Ympäristöministeriön rahoitta-massa JälkiPuu-Hankkeessa todettiin, että jättepuusta saadaan suurin netto-

hyöty, kun se käytetään energiapuuna (Manninen ym. 2015). Käyttämällä jätepuuta energiatuotantoon voidaan korvata osa fossiilisista polttoaineista ja vähentää niistä syntyviä päästöjä (mt.). Suomessa kulutetusta energiasta 37 % on tuotettu käyttämällä uusiutuvia energialähteitä ja puuenergian osuus uusiutuvista energianlähteistä on noin 74 % (Bioenergia s.a.). Puuenergia on merkittävässä asemassa, kun tarkastellaan suomen uusiutuvista energianlähteistä saatavaa energiaa (Bioenergian s.a.).

4.2 Kipsilevyn ympäristövaikutukset ja kiertotalous

Kipsilevyt valmistetaan kipsistä ja vedestä yhdistämällä ne lisäaineisiin kuten tärkkelykseen ja lasikuituun (Gyproc, Kipsilevyn elinkaari ja ympäristö). Kipsilevyissä on useasti kartonkipinta, mutta on olemassa myös levyjä, joissa ei ole kartonkipintaa. Kipsi saadaan louhimalla kipsikiveä, ja levyn valmistusprosessin aikana kipsiseokseen voidaan lisätä puhdasta kierrätyskipsijaetta (mt.). Kipsilevy on kierrätettävissä, ja sen pystyy palauttamaan valmistajan tehtaalte, jos kierrätysjäte on puhdasta, kuivaa ja täyttää valmistajan asettamat standardit (Gyproc, Kipsin kierrätys). Noin 20 % kipsilevystä on valmistettu kierrätyskipsistä, ja levittämällä tietoa kipsin kierrätyksestä määrä voitaisiin nostaa 30 prosenttiin (Saint-Gobain s.a.).

Kipsilevyssä ei ole uusiutuvaa materiaalia, paitsi pintakartonki (Häkkinen 2020a, 2). Kipsilevyyn ei myöskään ole varastoitunut hiilidioksidia (mts. 2). Kiertotaloudellisesti kipsilevyn uusiokäyttö on mahdollista, kuhan siitä syntyvä purku ja rakennusjäte käsitellään tuotetoimittajan ohjeiden mukaisesti. Kipsilevyllä ei ole hiilikädenjälkeä.

4.3 Teräksen ympäristövaikutukset ja kiertotalous

Perinteinen tapa valmistaa terästä on sulattaa rautamalmia. Sulatuksen yhteydessä sulatusmasuuneihin lisätään koksia ja hiiltä. (SSAB s.a.). Valmistuksessa syntyy hiilidioksidia, ja olemassa olevalla teknologialla ei ole mahdollista valmistaa terästä ilman hiilidioksidipäästöjä (mt.). Rakennusmateriaalina teräs on kauan käytössä, ja valmiina rakenteena se ei aiheuta ympäristölle haittoja eikä, se eritä taikka ime epäpuhtauksia itseensä (Väisänen 2007, 33). Terästä valmistetaan vuosittain noin 1100 miljoonaa tonnia globaalisti, ja tästä

ruostumatonta terästä on noin 24 miljoonaa tonnia (mts.33). Terästonnin valmistukseen malmista kuluu noin 5500 kilowattituntia energiaa ja jos teräs valmistetaan kierrätetystä teräksestä, energiankulutus, on noin viidennes (mts.33.) Suurimmat ympäristörasitukset teräksestä syntyy tuotantoprosessin alkupäässä eli terästehtaalla (mts. 33.)

Teräs on maailman kierrätetyin materiaali, sillä se on erittäin arvokasta, siihen on sitoutunut paljon energiaa ja sitä voidaan kierrättää loputtomiin (Teräsrakenneyhdistys s.a.). Teräsosien kierrätys on helppoa johtuen teräsrakentamisessa käytetyistä yksinkertaisista liitoksista ja teräksen magneettisuudesta, joka mahdollistaa materiaalien helpon erottelun (Väisänen 2007 33) .Terästä voidaan valmistaa puhtaasti kierrätysteräksestä käyttämällä valokaariuunia ja maailman terästuotannosta noin 32 % on kierrätysterästä (Teräsrakenneyhdistys). Euroopassa vastaava luku on reilut 55 % ja kiinassa noin 20 % (mt).

Teräksellä on hiilikädenjälki, ja rakennemateriaalina teräs ei ole uusiutuva rakennusmateriaali (Häkkinen 2020b). Teräs on kiertotalouden näkökulmasta hyvä materiaali kierrätysominaisuuksiltaan, mutta teräksen tuotanto aiheuttaa hiilidioksidipäästöjä. Teräksen valmistuksessa syntyvää kuonaa voidaan käyttää maa- ja tierakentamisessa, betoniteollisuudessa ja maanparannusaineena (Väisänen 2007, s 33). Valmistusprosessissa syntyvää koksikaasua voidaan käyttää kemianteollisuudessa masuuni- ja koksikaasut, jotka jäävät ylitse valmistusprosessissa, käytetään uudestaan tehtaan polttoaineena. Valmistusprosessissa syntyvä hukkalämpö pystytään hyödyntämään kaukolämmössä (mts.33).

4.4 Eristevillojen ympäristövaikutukset ja kiertotalous

Suomessa eristevilloja käytetään lämmön- ja ääneneristeenä. Yleisesti käytettyjä villatyyppejä ovat mineraalivillat ja puukuituiset villat. Eristevilloja on saatavana eristelevyinä, tuulensuojalevyinä, puhallusvillana ja kuormitusta kestäväinä jäykkänä eristelevynä. Vanhojen puhallusvillojen poisto rakennuksesta tapahtuu helposti suurtehoimurilla, jolla imetään vanhat eristevillat pois rakennuksesta (Uutiskeskus 2014). Levyvillat poistetaan rakennuksesta tai rakennusosasta käsin (Ekoeriste s.a.). Vanhat puhallusvillat voidaan käyttää uudelleen sellaisenaan, jos ne ovat rakenteellisesti kunnossa, eli villa on kuivaa ja

puhdasta (mt.). Villalevyjen uusiokäyttö on mahdollista rouhimalla ne rouhimella puhallusvillaksi, jolloin ne voidaan puhaltaa rakennukseen (Eko-Expert s.a.).

Mineraalivilloista tunnetuimpia ovat lasi- ja kivivillat, mutta mineraalivilloja on myös kuona- ja silikaattivilla (RT 36-10689:1999). Kuona- ja silikaattivilloja ei valmisteta Suomessa. Kivivilla koostuu kotimaisesta kivistä, joka sulatetaan ja joukkoon lisätään hieman orgaanista sideainetta. Lasivilla koostuu kvartsihiekkasta, soodasta ja kalkkikivistä. Lasivillan kuituraaka-aineista noin 60 % on kierrätyslasia. Lasivillan sidosaineena käytetty muovi on valmistettu öljystä, joka on uusiutumaton luonnonvara. Kivi- ja lasivillan materiaalit ovat uusiutumattomia. Mineraalivillat eivät maadu, mikä mahdollistaa niiden hyödyntämisen keventävinä rakenteina maanrakennustöissä (mts.1, 2, 4).

Puukuitueristeet koostuvat orgaanisista kuiduista (RT 36-11090, 2014). Koostumukseltaan puukuitueristeet ovat esimerkiksi selluloosaa, puuhioketta tai sanomalehtipaperia, joihin on lisätty palon- ja lahonestoaineita. Puhalletut puukuitueristeet voidaan uusiokäyttää sellaisinaan taikka laimentaa maanparannusaineeksi. Puukuitueristeet varastoivat itseensä hiiltä koko kasvuprosessin ajan, jonka takia niiden hiilitase on negatiivinen eli valmistuksesta aiheutuvat hiilidioksidipäästöt ovat pienemmät kuin materiaalin kyky varastoida hiilidioksidia (mts.1, 3, 4).

5 ELINKAARI

Kaikilla materiaaleilla ja tuotteilla on elinkaari. Elinkaari voi poiketa paljonkin riippuen materiaalin ominaisuuksista. Elinkaariajattelussa pyritään selvittämään tuotteen ympäristövaikutukset valmistuksesta, käytöstä ja loppusijoituksesta. Elinkaariajattelu rakentamisessa kattaa jakson maankäytön ja rakentamisen suunnittelusta, materiaalien hankintaan, rakentamiseen ja lopulta rakennuksen purkuun ja materiaalien kierrätykseen saakka (Rakennusteollisuus s.a.). Rakennushankkeessa rakennuksen elinkaaren suurin vaikuttaja on tilaaja, joka määrittelee rakennuksen käyttöiän, tilatarpeet ja tilaajan tarpeet ohjaavat suunnittelua (mt.). Suunnittelussa otetaan huomioon rakennuksen tekninen käyttöikä, ja vaikka jokin materiaalivalinta olisi valmistusvaiheessa kalliimpi kuin kilpaileva tuote, voi toinen materiaali olla rakennuksen elinkaaren

kannalta edullisempi esimerkiksi säästämällä energiaa taikka vaatimalla vähemmän huoltotoimenpiteitä.



Kuva 10 Rakennuksen elinkaari (Rakennustieto 2019)

Kuvasta 10 on havaittavissa, että käyttövaihe on rakennuksen elinkaaren pisin vaihe ja se voi jatkua, jopa useita satoja vuosia. Tämän takia oikeat materiaalivalinnat, ja rakenneratkaisut ovat rakennuksen elinkaaren kannalta tärkeitä.

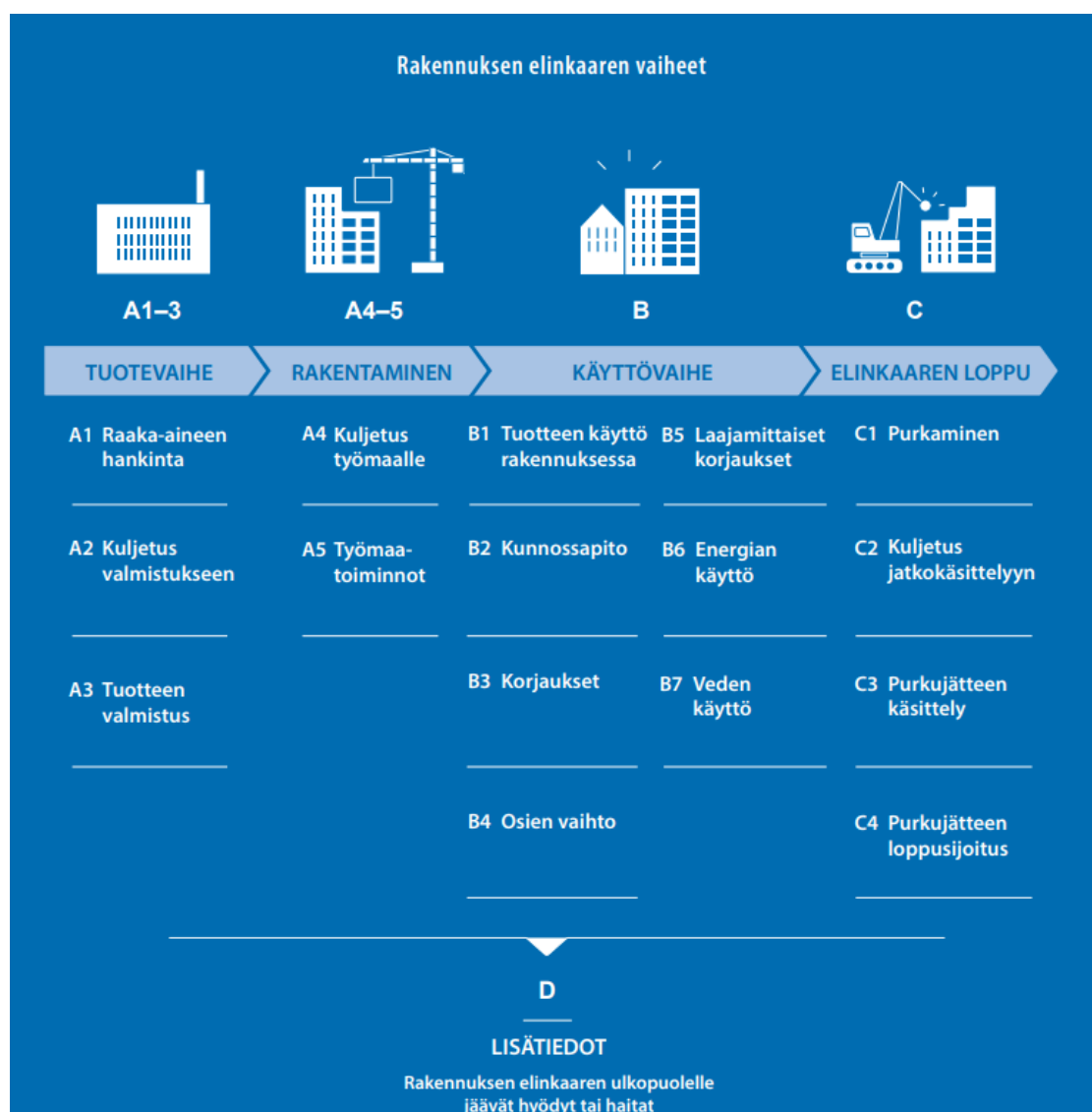
Taulukko 2 Rakennusmateriaalien elinkaaren prosentuaaliset kierrätys osuudet

Materiaali	Uusiokäyttö	Energiantuotanto	Jäte	Kierrätys
puu	0 %	95 %	5 %	0 %
kipsilevy	0 %	0 %	85 %	15 %
teräs*	8 %	0 %	2 %	90 %
kivivilla	0 %	0 %	100 %	0 %
lasivilla	0 %	0 %	100 %	0 %

Taulukossa 2 on esitetty tutkimuksessa tarkasteltujen rakennusmateriaalien elinkaaren jälkeinen skenaario (%). Taulukon arvoina käytetään tarkasteluhetkellä rakentamisen päästötietokannassa (co2da.fi s.a.) olevia arvoja. Teräksen arvo on merkitty *-merkillä, koska prosentuaaliset osuudet eroavat huomattavasti, kun tarkastellaan erilaisia terästuotteita. Tarkastelussa on kevyt teräsprofiili, joten tutkimuksessa käytetään kyseisen teräsjalosteen elinkaaren arvoja. Taulukosta 2 voidaan havaita, että materiaalien uusiokäyttö on tutkimushetkellä haasteellista, kun tarkastellaan yleisesti käytössä olevia metalleja.

5.1 Elinkaaren laskenta

Elinkaarta arvioidaan LCA- menetelmän (Life Cycle Assessment) mukaisesti. LCA-menetelmä on standardisoitu ja perustuu standardeihin ISO14040 (2006) ja ISO14044 (2006) (Heikkinen 2020, 11). Rakennusten LCA lasketaan tyypillisesti SFS-EN 15978 Sustainability of construction works Assessment of environmental performance of buildings menetelmän mukaisesti (mts.12). Laskennan indikaattorina on Global warming potential (GWP) ja laskentayksikkö on kgCO_{2e} (mts.11). Tässä tutkimuksessa elinkaarilaskenta suoritetaan ympäristöministeriön (2019) Rakennuksen vähähiilisyden arviointimenetelmän mukaisesti. Ympäristöministeriön arviointimenetelmä (2019, s.9) perustuu Euroopan komission laatimaan Level(s) menetelmään, joka pohjautuu aikaisemmin mainittuihin ISO14040 (2006) & 14044 (2006)-standardeihin.



Kuva 11 Rakennuksen elinkaaren vaiheet (Ympäristöministeriö, 2019, s.10)

Rakennuksen hiilijalanjäljen laskentaa varten tarvittavia lähtötietoja ovat materiaalien ja prosessien päästötiedot, sekä laskentatyökalun (Ympäristöministeriö 2019, 9–11). Rakennuksen elinkaari koostuu tuote-, rakentamis-, käyttö- ja loppuvaiheista (mts.14). Elinkaarivaiheen ulkopuolelle jäävät mahdolliset hyödyt ja haitat, jotka tarkastellaan erikseen (mts.14). Kuvassa 11 on esitetty rakennuksen elinkaariarvioinnin vaiheet ja moduulijako.

5.2 Tuotevaihe

Tuotevaihe koostuu moduuleista A1 raaka-aineen hankinta, A2 kuljetus valmistukseen ja A3 tuotteen valmistus (Ympäristöministeriö 2019, s.14). Tuotevaiheessa tehdään materiaaliluettelo rakennushankkeen menekeistä ja mahdolliset hävikit otetaan mukaan laskennassa (mts.15). Korjauskohteissa laskenta kohdistuu vain korjattaviin ja uusittaviin rakennusosiin ja tuotteisiin (mts.15). Uusiokäyttöön sijoittavien tuotteiden hiilijalanjälkeä ei huomioida.

	Sisältyy arviointiin	Ei sisälly arviointiin
Tontti	+ Maaosat + Tuennat ja vahvistukset + Päälysteet + Alueen rakenteet	- Alueen varusteet - Kasvillisuus - Kasvillisuuden, maaperän tai vesistöjen muutoksista aiheutuvat ilmastovaikutukset
Kantavat rakenteet	+ Perustukset + Alapohjat + Runko + Julkisivut, ovet ja ikkunat + Ulkotasot + Kattorakenteet	- Tuotteisiin kuulumattomat erilliset naulat, ruuvit, liimat, tiivisteet, saumaukset ja muut kiinnikkeet
Täydentävät rakenteet	+ Väliseinät ja ovet + Portaat + Pintarakenteet + Tyypilliset kiintokalusteet + Hormit ja tulisijat + Tilaelementit	- Pintamateriaalit ja listat - Pintakäsittelyt ja maalaukset - Tuotteisiin kuulumattomat erilliset naulat, ruuvit, liimat, tiivisteet, saumaukset ja muut kiinnikkeet
Talotekniikka	+ Lämmitysjärjestelmät + Vesi- ja viemärijärjestelmät + Ilmastointijärjestelmät + Jäähdytysjärjestelmät + Sprinklerit + Sähköjärjestelmät + Hissit	- Tietotekniset järjestelmät - Taloautomaatio - Varavirtajärjestelmät - Liukuportaat - Erilliset koneet ja laitteet
Työmaa	+ Työmaalla kulutettu energia	- Telineet, suojaukset - Väliaikaiset rakenteet, muotit ja tekniset laitteet - Työmaatilojen elinkaari - Työmaan henkilöliikenne

Kuva 12 Arvioitavat rakennusosat (Ympäristöministeriö 2019 18)

Rakennus- ja rakenneosia arvioitaessa tulee kiinnittää huomiota kuvan 12 taulukoituihin rajauksiin, jotta elinkaariarviossa ei ole ylimääräisiä rasitteita, kuten nauvoja.

5.3 Rakentamisvaihe

Rakentamisvaihe käsittää moduulit A4 ja A5. Moduuli A4, eli kuljetukset käsittelee, kuljetuksista syntyviä päästöjä sisältäen kaikista kuljetuksista ja varastoinneista syntyvät ympäristövaikutukset (Ympäristöministeriö 2019, 21). Moduuli A4 ei sisällä työkoneiden ja työntekijöiden matkoista syntyviä ympäristövaikutuksia. Kuljetuksien laskennassa kuorman käyttöaste tulomatalla on 80 % ja paluumatalla täyttöaste on 0 %. Ympäristövaikutukset huomioidaan rakentamisvaiheessa syntyvien jätteiden kuljetuksista ja elinkaaren lopussa syntyvien kuljetuksien osalta.

Moduuli A5 käsittelee työmaatoiminnoista syntyviä ympäristövaikutuksia (mts. 25). Ympäristövaikutukset lasketaan syntyneestä ostoenergiasta ja polttoaineista. Energia-arvio sisältää sen, kuinka paljon energiaa kuluu työmaan toimintojen ja sosiaalitulojen ylläpitämiseen. Sosiaalituloista aiheutuvat ympäristövaikutukset huomioidaan, vaikka ne eivät sijaitisi rakennuskohteen tontilla. Hankkeeseen hankitut rakennusmateriaalit lasketaan mukaan hankkeen ympäristövaikutuksiin huomioimalla niiden valmistuksesta syntyvät päästöt (mts. 22, 25).

5.4 Käyttövaihe

Käyttövaihe koostuu moduuleista B1-B7 (Ympäristöministeriö 2019, 14). B1-moduuli käsittelee tuotteen käyttöä rakennuksessa eli esimerkiksi viilennys- ja lämmityslaitteistoista haihtuvia aineita. B2-moduuli sisältää kunnossapidolliset päästöt eli siivouksesta ja kiinteistönhoidosta aiheutuvat ympäristöhaitat. B3-moduuli pitää sisällään rakennuksen elinkaaren aikana tulevat korjaukset, esimerkiksi maalaukset tai mahdollisesti rikkoutuneiden tuotteiden vaihdot.

B4-moduuli huomioi kaikkien tuotteiden vaihdot, joiden tekninen käyttöikä ylittyy rakennuksen elinkaaren aikana. Tilanteessa, jossa tuotteen tekninen käyt-

töikä on suurempi kuin rakennuksen elinkaari, voidaan tuotteen uudelleenkäytöstä saada ympäristöhyötyjä. Tällaiseen tilanteeseen voidaan päätyä esimerkiksi talotekniikan osalta, jossa tekniikkaa on rakennuksen elinkaaren aikana vaihdettu monesti ja rakennuksen elinkaaren lopussa käytössä olevat talotekniset ratkaisut ovat yhä toimivia, ja niillä on teknistä käyttöikää jäljellä. Tuotteen vaihtoväli voidaan määrittää yhtälöstä (4).

$$Vaihtoväli = \left[\left(\frac{Tavoiteikä}{Suunnitteluikä} \right) - 1 \right] \quad (4)$$

jossa	Vaihtoväli	Tuotteen laskennallinen vaihtoväli	
	Tavoiteikä	Rakennuksen suunniteltuikä	[V]
	Suunnitteluikä	Tuotteen suunnittelukäyttöikä	[V]

B5 käsittelee laajamittaisia korjauksia, kuten tilan muutoksia, taloteknisiä muutoksia ja muita ennalta suunnittelelmattomia muutostöitä. Jos rakennusta kunnostetaan ja kunnostustöitä ei ole huomioitu ennakoon tehdään elinkaaresta uusiarviointi. Muutostöistä aiheutuvat päästöt arvioidaan moduuleiden A1-A5 mukaisesti (SFS-EN 15978:2011, 24). B6- ja B7-moduulit käsittelevät kohteen energian- ja vedenkulutusta. B6 eli energiankulutus arvioidaan aina hankekohteisilla tiedoilla (Ympäristöministeri 2019 39, 45). Vedenkulutusta (B7) ei arvioida ympäristöministeriön arviointimenetelmässä (mts.39).

5.5 Elinkaaren loppu

Elinkaaren loppu sisältää moduulit C1-C4 (Ympäristöministeriö 2019 ,14). Moduuli C1 sisältää purkutyömaan energia- ja polttoainepäästöt (mts. 28). Energian ja polttoaineiden päästökertoimina käytetään samoja kuin moduulissa A5 (mts. 28).

Moduulissa C2 huomioidaan kaikki kuljetukset purkutyömaalta purkujätteen uusiokäyttö-, kierrätys- ja jätteenkäsittelypaikkoihin (Ympäristöministeriö 2019, s.22). Jos purkujätettä kuljetetaan välivarastointiin tai jatkokäsittelyyn, niin kuljetuksista aiheutuvat päästöt huomioidaan myös laskennassa. Kuljetusten hiilijalanjälki lasketaan kaikille kuljetusmuodoille erikseen ja laskennassa käytetään kuljetusmuodoille ja polttoaineille tyypillisiä päästökertoimia. Kuljetusetäi-

syyksien laskennassa käytetään laskenta hetkellä olemassa olevia jatkokäsittelypaikkoja. Kuljetuksissa täyttöasteina käytetään noutomatalla 0 % ja paluumatkalla 80 % täyttöastetta (mts. 22).

Moduuleihin C3 ja C4 sisältyy jätteenkäsittely ja loppusijoitus. Voidaan käyttää joko ympäristöministeriön Rakennuksen vähähiilisuuden arviointimenetelmän liitteessä kolme esitettyä taulukkoarvoja tai sitten voidaan laskea kaikille materiaalijakeille omat hiilijalanjäljet jätteenkäsittelystä ja loppusijoituksesta (Ympäristöministeriö 2019, s.21). Taulukkoarvot on esitetty kuvassa 13. Taulukkoarvoja käytettäessä on huomioitava, että tulokset tulee jyvittää koko rakennuksen käyttöiälle (mts. 45).

Tyypilliset päästöt (kgCO ₂ e/m ²)		
A1–3 Valmistus		<i>(lasketaan aina hankekohtaisin tiedoin)</i>
A4 Kuljetus työmaalle	10,20	Keskimääräinen kuljetusetäisyys Suomessa
A5 Uudisrakennustyömaan toiminnot	27,30	Työmaan energian ja polttonesteiden kulutus
B3–4 Korjausten energiankulutus ¹²	2,16	Materiaalien valmistus arvioitava erikseen
B6 Energian käyttö		<i>(lasketaan aina hankekohtaisin tiedoin)</i>
C1 Purkutyömaan toiminnot	7,80	Työmaan energian ja polttonesteiden kulutus
C2 Kuljetus jatkokäsittelyyn	10,20	Keskimääräinen kuljetusetäisyys Suomessa
C3–4 Jätteenkäsittely ja loppusijoitus	15,60	
Yhteensä	73,26	kgCO₂e/m²

Kuva 13 Elinkaaren eri vaiheiden päästöarvot (Ympäristöministeriö 2019, 45)

Laskettaessa moduuleita C3 ja C4 laskenta koostuu arvioinnista ja eri skenaarioista (mts.21). Arviointi vaiheessa arvioidaan rakennuksen purkamisesta aiheutuvien jättemateriaalien määrä ja määräksi oletetaan samat määrät, kuin valmistusvaiheessa, vaikka rakennukselle on voitu tehdä sen elinkaaren aikana osien vaihtoa ja muutostöitä. Korjaushankkeissa otetaan huomioon rakennuksessa ja sen tontilla jo valmiiksi olleet materiaalit. Siirtokelpoista rakennusta arvioitaessa laskennassa erotellaan siirrosta koituva jäte ja uusiokäytettävät rakennusosat. Siirtokelpoisen rakennuksen hiilijalanjälkilaskennassa huomioidaan vain siirrosta syntyvät jätteet ja mahdolliset hyödyt ilmoitetaan erikseen. Skenaarioiden arvioinnissa päästötietoina käytetään päästötietokannan skenaarioita rakennusmateriaaleille. Jos materiaalia hyödynnetään ener-

giantuotannossa, ilmoitetaan energiatuotannosta syntyvät hyödyt ja haitat elinkaaren ulkopuolisina tekijöinä moduulin D mukaisesti (mts.21).

5.6 Elinkaaren ulkopuoliset vaikutukset

Ympäristöministeriön (2019) vähähiilisyden arviointimenetelmän mukaan kaikki rakennuksen elinkaaren aikana purettavat tai poistettavat osat ovat jätettä elinkaariarvioinnin näkökulmasta. Rakennus- ja purkujätettä valmistettaessa tai hyödynnettäessä uudelleen käytettäväksi kohdennetaan uusiokäyttöön otosta syntyvät ympäristövaikutukset moduuleissa seuraavasti (mts.48):

- Rakentamisvaiheen jätteen hyödyntäminen (moduuli A5)
- Korjauksista ja osienvaihdosta syntyvän jätteen hyödyntäminen moduulit B3 ja B4
- Elinkaaren lopussa syntyvän jätteen hyödyntäminen moduuli C3

Tuotteiden ja materiaalien, jotka eivät ole jätettä, oletetaan kelpaavan elinkaariarvioinnin näkökulmasta energiantuotantoon, materiaalienkierrätykseen taikka uusiokäyttöön (Ympäristöministeriö 2019, s.50). Tuotteet ja materiaalit, joita voi käyttää edellä mainituilla tavoilla, kohdennetaan moduuliin D (mts.48).

Nettokasvihuonepäästöt arviointihetkellä rakennusosien ja tuotteiden uusiokäytöstä ovat hyötyjä, jotka saadaan, kun tuotteella tai osalla korvataan keski-vertoteknologialla Suomessa tuotettu osa tai tuote (Ympäristöministeriö 2019 48–49). Jätteen luokitellun jälkeen rakennusosille mahdollisesti tehtävät prosessit esimerkiksi osien palosuojaus sekä kuljetukset ovat rasitteita, jotka kohdennetaan moduuliin D, kunnes rakennusosille tai tuotteille on saavutettu korvattavia tuotteita vastaavat tekniset ominaisuudet (mts. 48–49).

Rakennusmateriaalien tai tuotteiden kierrättämisestä syntyneet nettokasvihuonepäästöt ovat kasvihuonepäästöjä, joilta olisi vältytty tai jotka aiheutuvat kierrätysprosessista (Ympäristöministeriö 2019, 49). Rakennusmateriaalien ja tuotteiden mahdollisen jätteenkierrättämisen jälkeen tehtävät kierrätyskelpoisten materiaalien tai tuotteiden jatkoprosessoimisesta syntyvät päästöt kohdennetaan moduuliin D, kunnes kierrätettävä materiaali tai tuote täyttää uusiokäytön vaatimat tekniset ja laadulliset ominaisuudet (mts.49). Jos materiaali

tai tuote ei saavuta kierrätysprosessissa teknisiä- ja laadullisia ominaisuuksia, ilmoitetaan materiaalin tai tuotteen päästöt rasiitteina moduulissa D käyttäen laatuerokertoimia (mts.49). Nettokasvihuonepäästöt, jotka ilmoitetaan moduulissa D, voivat olla vältettyjä tai aiheutettuja päästöjä. Laatuerokerroin lasketaan yhtälöllä (5).

$$\frac{X}{Y} = k \quad (5)$$

jossa	k	Laatuerokerroin	
	X	Kierrätettävätuote	[CO ₂ e/kg]
	Y	Uusiotuote	[CO ₂ e/kg]

Materiaalien ja tuotteiden kierto voi olla avointa tai suljettua kiertoa (Ympäristöministeriö 2019, 49–50). Avointa kiertoa on yleensä esimerkiksi muovin, puun tai bitumin kierto. Avoimen kierron nettokasvihuonepäästöjä laskettaessa tarkastellaan, kuinka paljon päästöjä korvataan, jos tarkastelussa oleva kierrätysmateriaali korvattaisiin teknisesti vastaavalla yleisesti Suomessa käytössä olevalla teknologialla valmistetulla tuotteella. Suljetun kierron muodostaa yleensä erilaiset metallituotteet. Suljetun kierron nettokasvihuonepäästöjä laskettaessa kierrätettävän tuotteen materiaalimäärästä vähennetään tuotteen valmistuksesta mahdollisesti syntyvä hävikkimäärä. Moduulissa D ilmoitetaan tällöin laskennallisesti vältetyistä päästöistä jäljelle jäävä osa, kun tuotteeseen joudutaan mahdollisesti lisäämään uutta tuotetta. Mahdollisesti tuotteeseen lisättävien uusiomateriaalin vaikutus lasketaan käyttämällä laatuerokertoimia (mts. 49–50).

Energiatuotannossa hyödynnettävien materiaalien ja tuotteiden nettokasvihuonepäästöjen laskennassa tarkastellaan, kuinka paljon teoreettisesti vältetään tai aiheutetaan päästöjä, jos materiaali tai tuote korvaisi arviointihetkellä Suomessa käytössä olevalla keskivertoteknologialla tuotettua energiaa vastaavan määrä (Ympäristöministeriö 2019, 50). Nettokasvihuonepäästöt, jotka syntyvät energiatuotannosta, sisältävät myös kuljetuksesta syntyvät päästöt kirjataan rasiitteina moduuliin D. Energiatuotantoon soveltuva materiaali on luokiteltu jätteeksi, mutta se ei täytä kokonaisuutena energiatuotantolaitoksen laatukriteereitä kirjataan nettokasvihuonepäästöt rasiitteina moduuliin D käyttäen laa-

tuerokertoimia. Tapauksissa, joissa jätteeksi luokittelu tapahtuu vasta energiantuotantoprosessin aikana, kirjataan osa prosessin kasvihuonepäästöistä moduuliin C3. Tällaisia tapauksia on esimerkiksi kyllästetty puutavara (mts. 50).

6 GWP-LASKENTA

Tutkimuksessa laskettiin toimeksiantajan Luomoa Oy:n M88-väliseinäelementin GWP-arvo moduuleissa A1-A3 ja kilpailevan väliseinärakenteen vastaavat arvot. Rakennustuotteiden GWP-arvot moduuleissa A1- A3 ovat yleisesti saatavissa ja moduuleiden A1- A3 arvoja käytetään rakennuksen elinkaarta arvioidessa. GWP-laskennassa huomioitiin myös moduulin D, eli hiilikädenjäljen vaikutukset tuotteiden ympäristövaikutuksia arvioitaessa, mutta ne ilmoitetaan erillisenä tietona (Ympäristöministeriö 2019, 34). Rakennusmateriaalien GWP-arvoina käytettiin rakentamisen päästötietokannassa tutkimushetkellä olevia GWP-arvoja. GWP-arvona rakentamislupaa varten käytetään tuotteen konservatiivista arvoa, joka on ilmoitettu päästötietokannassa esimerkiksi kipsilevyn konservatiiviseksi arvoksi, ilmoitetaan 0,31 kgCO₂e/kg (co2data.fi, s.a.). Tuotteen Gwp-arvo tuotteen valmista neliometriä kohden saadaan laskettua yhtälöllä (6).

(6)

$$\begin{aligned} GWP A1 - A3 * \text{Materiaalinpaino} \frac{kg}{m^2} * \text{materiaalin hukkakerroin} \\ = \text{Tuotteen GWP A1 - A3} \end{aligned}$$

Tuotteen hiilikädenjälki saadaan vastaavasti laskettua yhtälöllä (7).

(7)

$$GWP D * \text{TUOTTEENPAINO} \left(\frac{KG}{M^2} \right) = \text{TUOTTEEN HIILIKÄDENJÄLKI D}$$

Tuotteiden tilavuuspainoina käytetään Rakentamisen päästötietokannassa olevia tilavuuspainoja kg/m³. Hukkakertoimena, eli kertoimena, joka ilmaisee kuinka paljon materiaalista, menee keskimääräisesti hukkaan, käytetään Rakentamisen päästötietokannassa olevia arvoja (CO2data.fi).

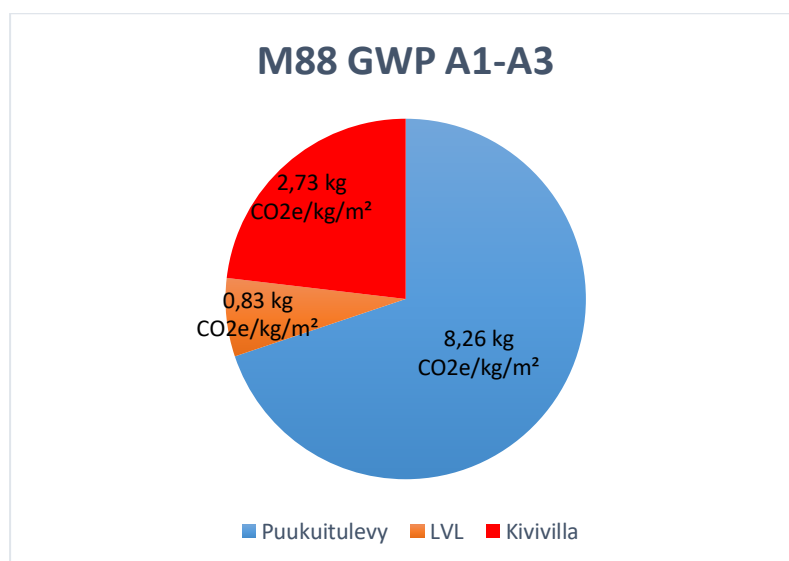
6.1 M88-väliseinäelementin GWP

Luomoan M88-väliseinäelementissä runkotolppina on LVL ja runkotolppien jako keskeltä keskelle on 600 mm, eli kun tarkastellaan tuotteesta yhtä neliometriä, lasketaan keskimääräinen runkotolppien määrä tarkasteltavaa neliometriä kohden yhtälöllä (8).

(8)

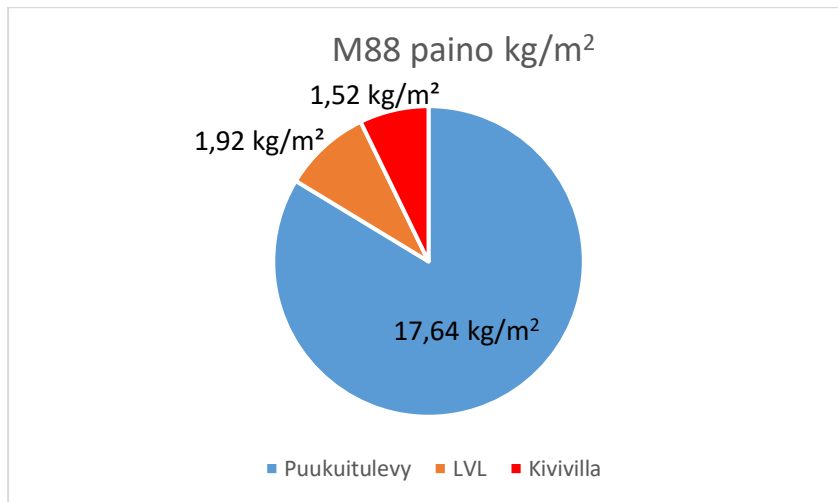
$$\text{metri (mm)}/\text{runkotolppa jako (mm)} = \text{keskimääräinen tolppamäärä}$$

M88 väliseinäelementissä levytyksenä käytetään puukuitulevyä ja ääneneristeenä toimii kivivilla. Väliseinäelementtien pintaviimeistelyä ei oteta huomioon hiilikäden- ja jalanjälkilaskennassa, koska ne huomioidaan täydentävinä rakenteina, jolloin ympäristöministeriön vähähiilisyden arviointimenetelmän (2019, 18) mukaan niitä ei tarvitse huomioida. Kuvasta 14 on havaittavissa, että M88-väliseinäelementin hiilijalanjälki koostuu suurimmaksi osaksi rakennuslevynä käytettävästä puukuitulevystä, joka on myös massallisesti suurin tekijä elementissä.



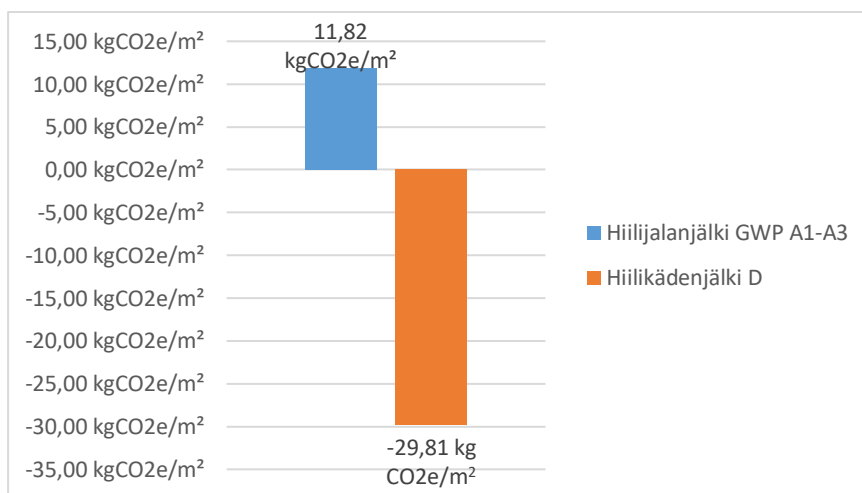
Kuva 14 M88 GWP A1-A3

M88 väliseinäelementin hiilijalanjäljeksi neliometriä kohden saatiin 11,82 kgCO₂e/m² ja painoksi 20,11 kg/m², kun ei huomioida pintaviimeistelyä. Pintaviimeistelyä ei huomioida, koska ympäristöministeriön rakennuksen vähähiilisyden arviointimenetelmän (2019 18) ohjeistuksen mukaan pintaviimeistelyä ei tarvitse huomioida. Elementin painojakauma on esitetty kuvassa 15.



Kuva 15 M88 painonjakautuma

M88-väliseinäelementin hiilijalan- ja kädenjälki on ilmoitettu kuvassa 16. Kuvasta voidaan huomata, että vaikka hiilijalanjälki on samankaltainen kuin kipsilevytetyn seinän, niin positiiviset ympäristövaikutukset eli hiilikädenjälki on todella hyvä johtuen puupohjaisien materiaalien hyötykäytöstä. Hiilikädenjäljeksi moduulissa D saatiin $-29.81 \text{ kgCO}_2/\text{m}^2$.



Kuva 16 M88 hiilikäden- ja jalanjälki

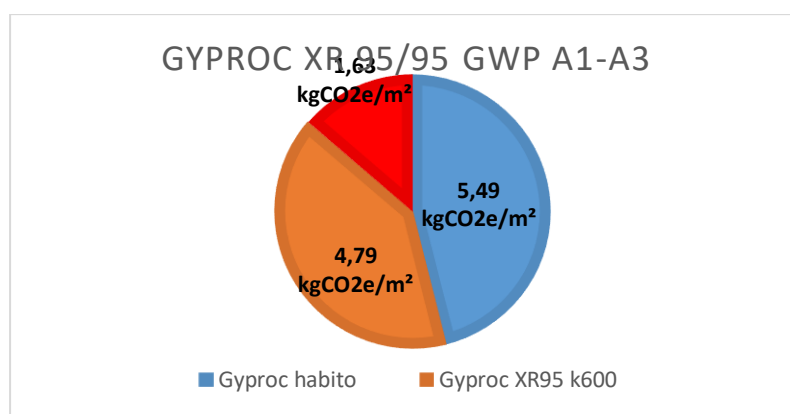
Kuvasta 16 pystytään laskemaan rakenneratkaisun hiilitaseeksi $-17.99 \text{ kgCO}_2\text{e}/\text{m}^2$, eli tuotteen hiilitase on negatiivinen. Negatiivinen hiilitase tarkoittaa, että rakenteen positiiviset ympäristövaikutukset ovat suuremmat kuin negatiiviset ympäristövaikutukset.

6.2 Teräsrunkoisen väliseinän GWP

Tutkimukseen valitulle teräsrunkoiselle väliseinälle Gyproc XR 95/95 (600) H-H M66 oli tuotevalmistaja Saint-Gobain ilmoittanut GWP A1-A3 arvoksi 10,91 kgCO₂e/m² (kuva 2, s.10). Tarkistuslaskennassa ei saatu vastaavaa arvoa, kun käytettiin konservatiivisia Gwp-arvoja, hukkakertoimia ja tilavuuden muunnoskertoimia. Tarkistuslaskennassa väliseinätyypin kgCO₂e/m²-arvoksi saatiin 11,91. Tuloksen ollessa 1 kgCO₂e/m² suurempi kuin Saint-Gobainin ilmoittama arvo tehtiin vielä vertaileva laskenta, jossa käytettiin rakennusmateriaali valmistajien ilmoittamia tilavuuspainoja ja ei huomioitu hukkakertoimia. Toisella laskenta kerralla seinätyypille GWP-arvoksi saatiin 11,01 kgCO₂e/m², joka on lähellä Saint-Gobainin ilmoittamaa GWP-arvoa. Voidaan siis todeta, että Saint-Gobainin ilmoittamassa arvossa ei ollut huomioitu hukkakertoimia ja tuotepainoina ei ollut käytetty yleisiä tilavuuspainoja, jotka ovat saatavissa Rakentamisen päästötietokannassa (Co2data.fi). Eroavaisuus tarkistuslaskennassa saadulla arvolla tuotevalmistajan saatuun arvoon oli 9.1 %, eli eroavaisuus on merkittävä, kun tarkastellaan suurempia kokonaisuuksia.

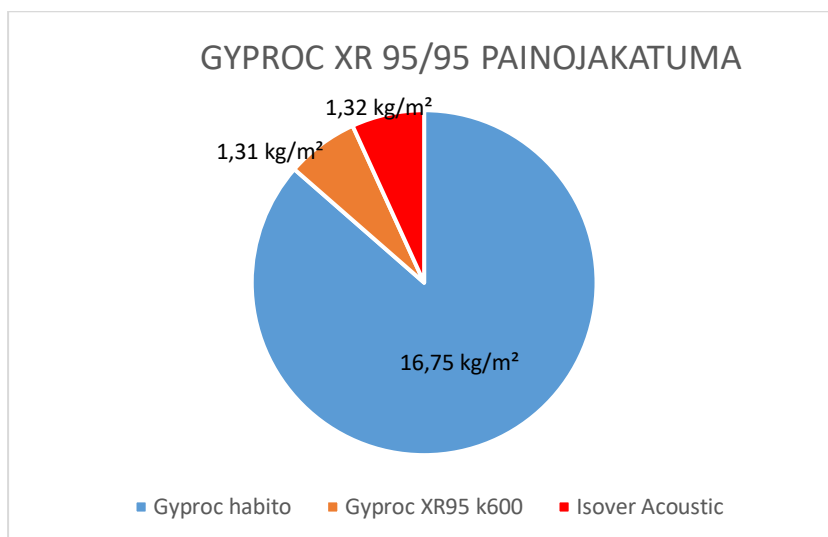
Tutkimuksessa seinätyypille käytettiin tarkistuslaskennalla saatua arvoa 11.91 kgCO₂e/m², koska kyseinen arvo sisältää materiaalihukat ja tilavuuspainoina on käytetty rakennusmateriaaleille tyypillisiä massoja.

Väliseinätyypin hiilijalanjäljen jakauma on esitetty kuvassa 17. Kuvasta on havaittavissa, että väliseinätyypin kgCO₂e/m²-arvo on jakaantunut lähes tasaisesti kipsilevytyksen ja teräsrungon välillä, vaikka rakenteen massasta merkittävä osa koostuu kipsilevytyksestä (kuva 18).



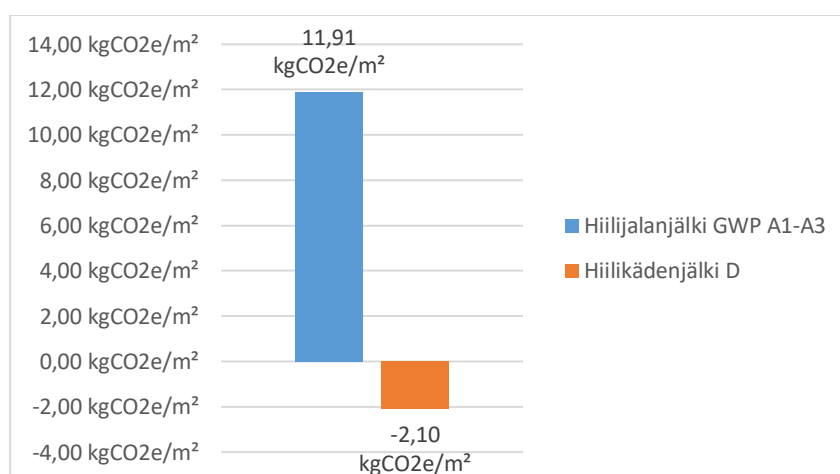
Kuva 17 Gyproc XR 95/95 väliseinän GWP A1-A3

Teräsrungon hiilijalanjälki on samankaltainen kuin kipsilevytyksen johtuen teräksen valmistusprosessin energiantensiivisyydestä ja teräksen materiaalien hankintaprosessista. Väliseinän massaksi ilman pintakäsittelyä saatiin 19,38 kg/m².



Kuva 18 Gyproc XR 95/95 painojakautuma

Teräsrunkoisen Gyproc XR 95/95-väliseinän elinkaaren ulkopuoliset vaikutukset moduulissa D jäivät pieniksi. Teräs oli ainut materiaali, jolla oli elinkaaren ulkopuolisia vaikutuksia, mutta se oli myös massallisesti kevyin osa väliseinärakennetta. Väliseinärakenteen hiilikädenjäljeksi moduulissa D saatiin -2,1 kgCO₂e/m². Kuvassa 19 on esitetty tarkastelussa olleen teräsrunkoisen väliseinän hiilikäden- ja hiilijalanjälki.

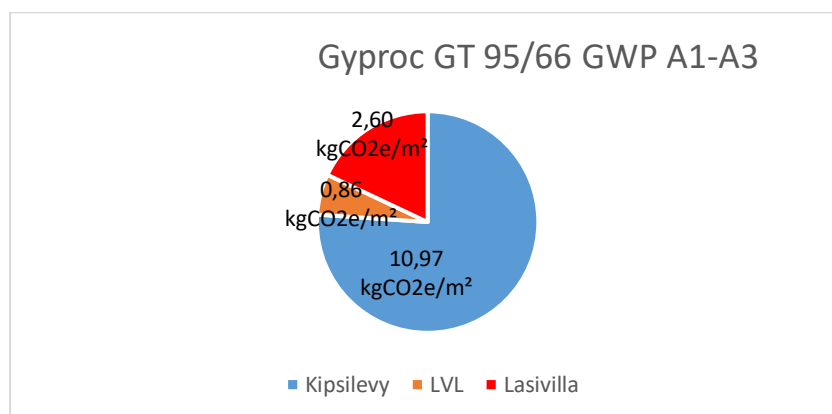


Kuva 19 Gyproc XR 95/95 Hiilikäden- ja jalanjälki

Teräsrunkoisen rakenneratkaisun hiilitaseeksi saatiin 9.81 kgCO₂e/m². Hiilitaseen ollessa positiivinen rakenteen materiaalien hiilijalanjälki on suurempi kuin hiilikädenjälki.

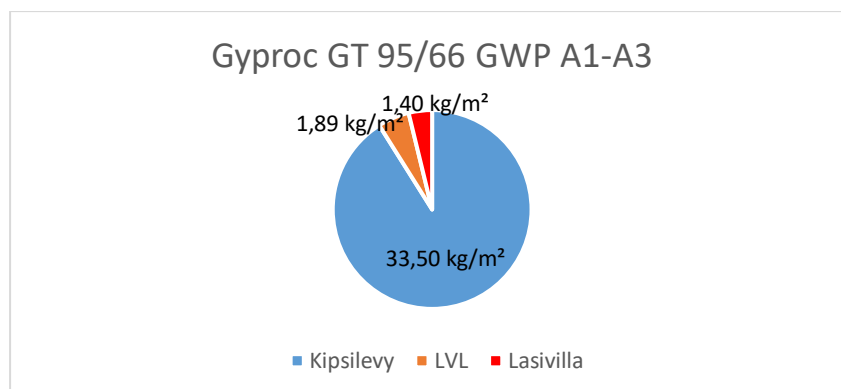
6.3 Puurunkoisen väliseinän GWP

Tutkimuskohteeksi valitussa puisessa väliseinässä oli runkotolppien väli 600 mm keskeltä keskelle, joten kun tarkasteltiin neliömetrin kokoista aluetta, laskettiin yhtälöllä kahdeksan runkotolppien keskimääräinen määrä tarkasteltavalla alueella. Väliseinän GWP-arvo koostui myös suurimmaksi osaksi kipsilevystä ja vain murto-osa GWP-arvosta tuli ääneneristysvillasta ja runkotolpista. GWP-arvon jakautuma on esitetty kuvassa 20.



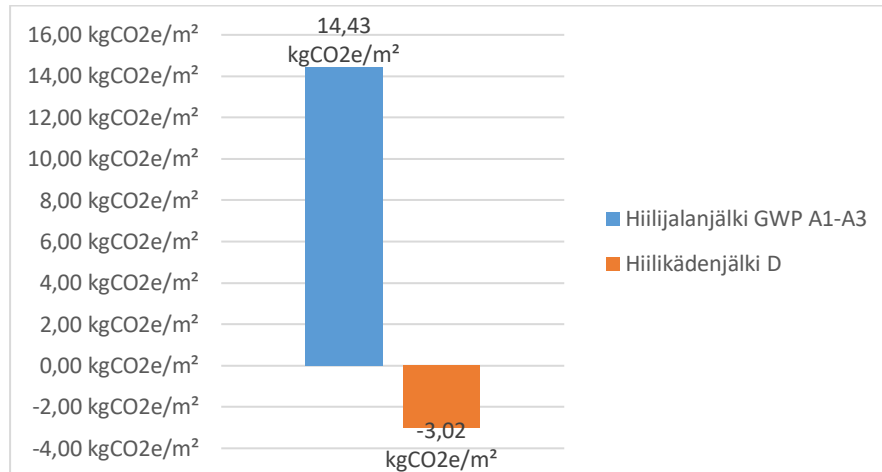
Kuva 20 Gyproc GT 95/66 väliseinän GWP A1-A3

Tarkasteltava väliseinä oli rakenteellisesti raskain neliömassaltaan 36,79 kg/m². Väliseinän massa johtui molemmin puolin asennetusta kipsilevytyksestä, kuten kuvasta 21 voidaan huomata.



Kuva 21 Gyproc GT 95/66 väliseinän painojakautuma

Puurunkoisella väliseinällä Gyproc GT 95/66 oli pieni hiilikädenjälki. LVL runko oli ainut materiaali, jolla oli elinkaaren ulkopuolisia vaikutuksia moduulissa D, mutta massallisesti se oli kevyt. Puurunkoisella väliseinällä hiilikädenjäljeksi saatiin $-3,02 \text{ kgCO}_2\text{e/m}^2$. Kuvassa 22 esitetään tarkasteltavana olleen väliseinärakenteen hiilikäden- ja jalanjälki.



Kuva 22 Gyproc GT 95/66 väliseinän hiilikäden- ja jalanjälki

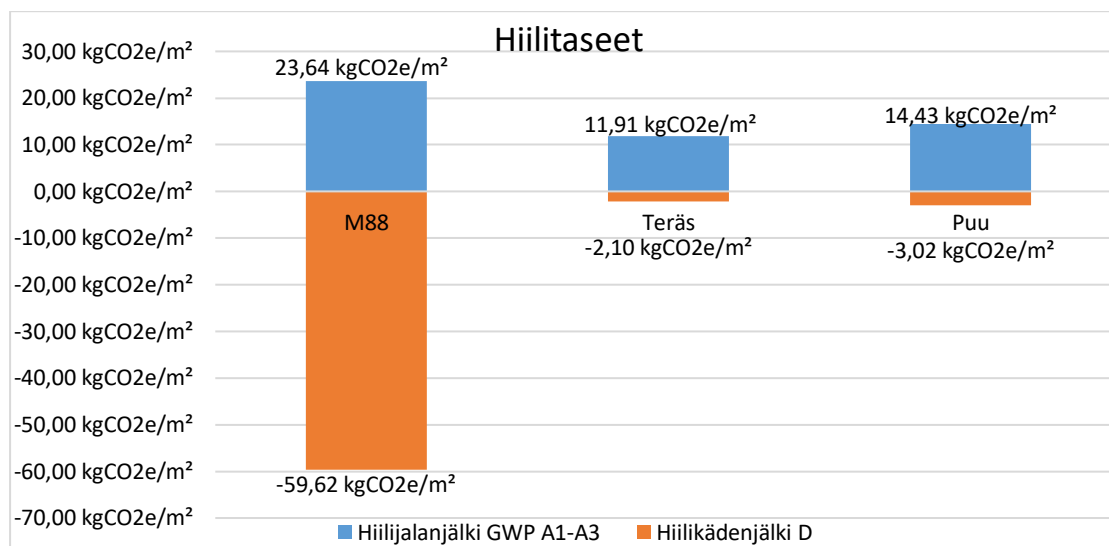
Puurunkoisen väliseinärakenteen hiilitaseeksi saatiin $11,41 \text{ kgCO}_2\text{e/m}^2$. Hiilitase on positiivinen eli rakennemateriaalien hiilijalanjälki on suurempi kuin kädenjälki.

6.4 GWP- ja kiertotalous: tulokset

Yhtä neliometriä tarkasteltaessa Luomoan M88 väliseinäelementin GWP-arvo moduuleissa A1-A3 oli pienin tarkastelussa olleista seinärakenteista. On kumminkin huomioitava, että elementtien akustiset ominaisuudet ovat heikommät kuin kilpailevien rakennusratkaisujen, kun tarkastellaan yhdellä elementillä toteutettua rakennetta, jolloin ilmanääneneristävyys luku R_w on 38 dB. Akustisten ominaisuuksien takia, joudutaan käyttämään tuplaelementtejä, jotta saavutetaan kohteessa vaatimuksena ollut ilmaääneneristävyys luku R_w 48 dB joka kaksinkertaistaa väliseinäelementeistä johtuvat CO_2e -päästöt. Ottaessa huomioon tuplaelementeistä syntyvät CO_2e -päästöt moduuleissa A1-A3 saadaan M88 väliseinäelementille GWP-arvoksi $23,64 \text{ kgCO}_2\text{e/m}^2$. Kumminkin arvoa $23,64 \text{ kgCO}_2\text{e/m}^2$ tulee käyttää vain, kun on asetettu akustisia vaatimuksia, joita ei voida saavuttaa yhdellä elementillä.

Tutkimuksessa tarkasteluun valitun teräsrunkoisen väliseinän CO₂e-päästöt moduuleissa A1-A3 olivat 11,91 kgCO₂e/m², joka oli pienin arvo, kun otettiin huomioon akustiset vaatimukset. Vaikka teräs on tutkimukseen valituista rakennemateriaaleista raskain ympäristölle (Co2data.fi, s.a.) Gyprocin Gypsteel XR 95 ääneneristys ranka on rakenteellisesti kevyt, mikä vaikuttaa positiivisesti, kun tarkastellaan CO₂e-päästöjä. Puurunkoinen väliseinäratkaisu sijoittui puhtaasti yhtä neliometriä tarkasteltaessa raskaimmaksi rakenneratkaisuksi ja kun huomioidaan myös akustiset vaatimukset puurunkoisen väliseinäratkaisun CO₂e-päästöt, olivat keskimmäisinä tarkastelussa olleista väliseinäratkaisuista. CO₂e-päästöt olivat yhtä neliometriä kohden 14,43 kgCO₂e/m², johtuen suureksi osaksi kaksinkertaisesta kipsilevytyksestä.

Tarkasteltaessa väliseinärakenteiden elinkaaren ulkopuolisia vaikutuksia moduulissa D voidaan havaita, että M88 väliseinäelementillä on yhdellä elementillä 1422 % suurempi hiilikädenjälki kuin tarkastelussa olleella teräsrunkoisella väliseinällä ja puurunkoiseen väliseinään verrattuna ero on 987 %. Huomioitaessa akustisien vaatimuksien takia tuleva tuplaelementointi saadaan M88 väliseinäelementille hiilikäden jäljeksi -59,62 kgCO₂e/m², joka on 2844-% suurempi kuin tarkastelussa olleella teräsrunkoisella väliseinärakenteella (-2,1 kgCO₂e/m²) ja 1974-% suurempi kuin tarkastelun puurunkoisella väliseinärakenteella (- 3,02 kgCO₂e/m²). Suuriero johtuu M88 väliseinäelementtien materiaalivalinnoista, jotka ovat puupainotteisia. Katsottaessa tuotteiden hiilitaseita voidaan todeta, että vain M88 väliseinäelementillä on negatiivinen hiilitase eli sen ympäristövaikutukset moduuleissa A1-A3 ovat pienemmät kuin elinkaaren ulkopuoliset vaikutukset moduulissa D. Hiilitaseet on esitetty kuvassa 23.



Kuva 23 Väliseinäratkaisujen hiilitaseet

Tutkittaessa väliseinäratkaisujen elinkaarta ei voida tarkastella puhtaasti materiaalivalinnoista syntyviä hiilikäden- ja jalanjälkiä. Vaikka yksinkertaistetuilla menetelmillä saadaan arvioiduksi ympäristövaikutukset moduuleissa A1-A3 & D tulee katsoa väliseinäratkaisujen rakennusmateriaalien elinkaarta, myös kiertotaloudellisesta näkökulmasta, koska kiertotaloudellisilla ratkaisuilla saadaan materiaalien elinkaarta pidennettyä.

Puupohjaisilla tuotteilla elinkaarenloppusijoitus on energiantuotannossa, joten tulee tarkastella energiantuotannosta saatua energian määrää. Suomalainen rakennuspuu on yleensä havupuuta eli kuusta taikka mäntyä. Männyn lämpöarvo eli arvo, joka ilmaisee montako kilowattituntia energiaa kilogramma tuottaa energiantuotannossa, on 4,15 kWh/kg (HSY s.a.). Kuusella vastaava-arvo on 4,10 kWh/kg. LVL ja lastulevy sisältää molempia puulajeja käytetään energiantuotantoa tarkasteltaessa interpoloitua väliarvoa 4.125 kWh/kg. Rakentamisen päästötietokannassa ilmoitetaan, että lastulevyn painosta 100 % käytetään energiantuotantoon ja LVL puutavarasta 95 % käytetään energiantuotannossa ja 5 % loppusijoitetaan jätteeksi (co2data.fi s.a.).

M88 väliseinäelementissä on energiantuotantoon soveltuvia puutuotteita 18,54 kg/m². Energiantuotannossa M88 väliseinäelementistä saadaan 76,47 kWh/m² energiaa. Saadulla energialla korvataan tarkasteluhetkellä polttoaineella Suomessa tuotettua energiaa (Ympäristöministeriö 2019, s.50). Poltto-

aineen päästökertoimenä käytetään Ympäristöministeriön Rakennuksen vähähiilisyyden arviointimenetelmän (2019) liitteessä neljä olevia taulukkoarvoja (kuva 24). M88 väliseinäelementistä saatavalla energialla korvataan 19,88 kgCO₂/m² päästöjä. Polttamisen päästöt pitäisi kirjata rasiitteina moduuliin D, joka heikentäisi M88 väliseinäelementin hiilikädenjälkeä ja hiilitasetta, mutta polttoprosessin päästöihin vaikuttaa energiantuotantolaitoksen käytössä oleva teknologia, jolla karsitaan hiilidioksidipäästöjä, joten energiantuotannosta aiheutuvat rasiitteet moduuliin D tulee tarkastella aina tapauskohtaisesti. Elementissä käytettävän kivivillan loppusijoitukseksi Rakentamisen päästötietokannassa (co2data.fi) ilmoitetaan jäte, mutta kivivillavalmistaja Paroc on kehittänyt yhteistyökumppaneidensa kanssa REWOOL-prosessin, jonka avulla kivivilla pystytään uusiokäyttämään puhallusvillana (Paroc s.a.). Väliseinissä käytettävä ääneneristysvilla ei altistu elinkaaren aikana diffuusiolle taikka haitallisille ilmapvirtauksille, joten ne pysyvät puhtaina ja soveltuvina uusiokäyttöön. Voidaan siis todeta, että M88 väliseinäelementin materiaalivalinnat ovat hyvin hyödynnettävissä joko energiantuotannossa tai uusiokäytössä. M88 väliseinäelementtien modulaarinen asennustapa mahdollistaa myös elementtien uudelleen sijoittelun, joka pidentää väliseinien elinkaarta toimitilakohteessa, jossa tilan käyttäjät voivat vaihtua monta kertaa rakennuksen elinkaaren aikana.

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

Kuva 24 Energianmuotojen päästökertoimet g CO₂/kWh (Ympäristöministeriö 2019)

Tutkimuksessa tarkastelussa puurunkoisessa väliseinässä oli energian tuotantoon soveltuvia materiaaleja vain puurunko, josta saadaan energiaa 7,78 kWh/m², jolla voidaan korvata 2,02 kgCO₂/m² energiantuotannon polttoainepäästöjä. Väliseinän kipsilevytyksestä 85 % päätyy uusiokäyttöön ja 15 % jätteeksi, kun käytetään Rakentamisen päästötietokannan (co2data.fi s.a.) antamia elinkaaren jälkeisen skenaarion prosentuaalisia-arvoja. Puurunkoisen

väliseinän ääneneristysvillan voi uusiokäyttää puhallusvillana kivivillan tapaan, vaikka Rakentamisen päästötietokannassa ilmoitetaan eristevillan olevan kokonaan jätettä. Voidaan siis todeta, että puurunkoisen väliseinäratkaisun materiaalien elinkaari vaikuttaa hyvältä, suurimman ongelman aiheuttaa kipsilevytytys, sillä sitä ei olemassa olevan datan mukaan vielä hyödynnetä kokonaan uusiokäytössä taikka energiatuotannossa.

Teräsrunkoisessa väliseinässä ei ole materiaaleja, jotka soveltuisivat energian tuotantoon. Runkomateriaalina toimiva teräs voidaan kierrättää kokonaan, jolloin runkomateriaali pysyy teoriassa loputtomiin kierrossa (Teräsrakenneyhdistys s.a.). Levytyksenä toimivan kipsilevyn elinkaari on identtinen puurunkoisen väliseinärakenteen levytykseen. Eli Rakentamisen päästötietokannassa (co2data.fi s.a.) ilmoitettujen arvojen mukaan uusiokäyttöön päätyy 85 % ja jätteeksi 15 %. Ääneneristeenä toimiva mineraalivilla voidaan nykyisillä metodeilla rouhia puhallusvillaksi, mutta rakentamisen päästötietokannassa ilmoitetaan materiaalin päätyvän jätteeksi, josta johtuen tutkimuksessa ääneneristettä on käsitelty tutkimuksessa jätteenä.

Taulukko 3 Seinärakenteiden elinkaaren jälkeinen skenaario %

Rakenne	Uusiokäyttö	Energian tuotanto	Jäte	Kierrätys
M88	0 %	87,6 %	12,4 %	0 %
Puurunkoinen	0 %	4,9 %	77,4 %	17,47 %
Teräsrunkoinen	1 %	0 %	80 %	19 %

Taulukossa esitetään tutkimuksessa olleiden väliseinärakenteiden elinkaaren jälkeisen skenaarion prosentit. Taulukosta voidaan havaita, että puurunkoisen ja teräsrunkoisen väliseinärakenteen rakennusmateriaalit päätyvät pääsääntöisesti jätteeksi ja niistä ei saada ulosmitattua uusiokäyttö- taikka energiahyödyntämispotentiaalia nykyisillä menetelmillä. Kuitenkin teräsrunkoisen ja puurunkoisen väliseinärakenteen levytyksenä toimiva kipsilevy voidaan osittain kierrättää, joka nostaa kierrätyskelpoisin materiaalien osuuden seinärakenteissa 17–20 % kokoluokkaan. M88 väliseinäelementissä ei ole materiaa-

leja, jotka soveltuisivat kierrätykseen, jolloin laskennallisesti suurin osa materiaaleista päätyy energian tuotantoon. Tulee kuitenkin huomioida, että vaikka energian tuotanto on parempi loppusijoitus kuin jäte johtuen puupohjaisen energian puhtaudesta niin molemmat ovat loppusijoituksena lopullisia, eli materiaali ei pääse kierrätykseen taikka uusiokäyttöön.

7 POHDINTA

Opinnäytetyöni tarkoituksena oli selvittää kuinka muuntojoustavat väliseinäelementit soveltuvat toimitilarakentamiseen, ja millaisia etuja taikka haasteita niillä on verrattuna perinteisiin väliseinäratkaisuihin. Suurimmaksi haasteeksi tutkimusta tehdessä tuli löytää rakenneratkaisut, jotka olivat tasavertaisia toimeksiantajan tuotteen kanssa, jotta tutkimuksessa säilyi puolueettomuus. Case-Kohteella käynnit väliseinäurakan alku- ja keskivaiheessa avasivat elementtien asennusprosessia ja saadulla tiedolla pystyin hyvin arvioimaan työsaavutuksia ja järjestelmän haasteita.

Väliseinäelementeillä toteutettavassa urakassa tulee tilaajan- ja suunnittelijoiden huomioida, että suunnitelmien tulee olla melkein valmiita jo siinä kohtaa, kun tehdas aloittaa tuotannon, jotta elementtien varustelu voidaan toteuttaa tilaajan toiveiden mukaisesti. Case-Kohteessa oli hieman haasteita suunnitelmien yhteen sovittamisessa, jonka takia elementteihin ei asennettu sähköputkituksia, mutta asia tässä kohteessa työmaatoimintoja johtuen elementtien jäävän kavitaatiotilan hyödyntämistä. Työsaavutukset elementtien asentamiselle olivat kuitenkin allekirjoittaneen mielestä hyvällä tasolla, vaikka kohde oli korkeutensa puolesta haastava. Toimeksiantajan kanssa käydyissä keskusteluissa saimme mielestäni ideoitua järjestelmään parannuksia, joilla tulevaisuudessa voidaan vielä nopeuttaa asennusnopeutta, varsinkin korkeissa toimitiloissa.

Kiertotaloudellisesti muuntojoustavat väliseinäelementit olivat haastavia arvioida. Modular-järjestelmän väliseinät ovat täysin irrotettavissa ja järjesteltävissä uudelleen samassa tai eritoimitilassa, josta johtuen tuote pysyy pitkään kierrossa. Modular-järjestelmän suurin etu on juuri niiden muuntojoustavuus, josta johtuen niiden tilaaja säilyttää rahalliset investointinsa pitkään ja voi to-

teuttaa tilan muutoksia helposti ilman suurempia remontteja. M88 väliseinäelementin ainoa heikkous materiaaliosastolla oli kivivilla, joka on kiertotaloudellisesti haastava. Kivivilla ollaan kumminkin korvaamassa uusiutuvasta materiaalista tuotetulla eristeellä, jonka ansiosta väliseinäelementtien hiilijalan- ja käden jälki tulee paranemaan entisestään, mutta kyseisellä eristeellä toteutettu väliseinäelementti ei vielä ollut tuotannossa tutkimushetkellä.

Lähteet

Bioenergia. s.a. Puuenergia. WWW-artikkeli. Saatavilla: <https://www.bioenergia.fi/tietopankki/puuenergia/> [viitattu 6.12.2021].

co2data.fi. s.a. Rakentamisen päästötietokanta. WWW-sivu. Saatavissa: <https://co2data.fi/> [viitattu 14.10.2021].

Ekoeriste. s.a. Eristeiden poisto. WWW-artikkeli. Saatavissa: <https://ekoeriste.com/eristeiden-poisto/> [viitattu 6.12.2021].

Eko-Expert. s.a. Rakennuseristeiden kierrätys ja uusiokäyttö. WWW-artikkeli. Saatavissa: <https://eko-expert.com/palvelut/rakennuseristeiden-kierratys-ja-uusiokaytto/> [viitattu 6.12.2021].

Gyproc . s.a. Kipsilevyn elinkaari ja ympäristö. WWW-artikkeli. Saatavissa: <https://www.gyproc.fi/suunnittelu/vastuullisuus/kipsilevyn-elinkaari-ja-ymp%C3%A4rist%C3%B6> [viitattu 14.10.2021].

Gyproc . s.a. Kipsin kierrätys. WWW-artikkeli. Saatavissa: <https://www.gyproc.fi/kipsin-kierratys> [viitattu 14.10.2021].

Gyproc. s.a. Väliseinävalitsin. WWW-sivu. Saatavissa: <https://www.gyproc.fi/v%C3%A4lisein%C3%A4valitsin> [viitattu 25.11.2021]

Heikkinen, S. 2020. Rakennusten elinkaarivaikutusten arviointi ja käyttösuunnittelun vaikutus. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://www.ril.fi/media/2020/jasenyys/tietoiskut/sanni-heikkinen-ril-tietoisku-lca-laskenta-ja-kayttoikasusuunnittelu.pdf> [viitattu 19.10.2021].

HSY. s.a. Mikä on paras puulaji polttoon? . WWW-artikkeli. Saatavissa: <https://www.hsy.fi/poltapuhastaasti/polttopuun-hankinta/puulajit/> [viitattu 6.12.2021].

Häkkinen, T. 2020a. Generic data for boards and mineral product/ gypsum board. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://co2data.fi/reports/Minerals-gypsum-board-2.pdf> [viitattu 14.10].

Häkkinen, T. 2020b. Generic data for metals-stainless steel. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://co2data.fi/reports/Metal-stainless-steel-2.pdf> [viitattu 14.10.2021].

Jätelaki 646/2011

Kiwa. s.a. FSC-sertifiointi. WWW-sivu. Saatavissa: https://www.kiwa.com/fi/fi/palvelumme/puun-alkuperaketjun-hallinnan-sertifiointi-fsc-sertifiointi/?qclid=Cj0KCQiAhf2MBhDNARIsAKXU5GTeL2VmL-kYHj9zS0F4gxjKmelmkcl0aRVCLuzuydYVOt2T0oPD1dPoaAn4hEALw_wcB [viitattu 25.11.2021].

Manninen, K., Leskinen, P. Myllymaa, T., Judl, J. & Grönroos, J., 2015. Jätepohjaisten liikennebiopolttoaineiden sekä puujätteiden LCA-tarkastelut. WWW-artikkeli. Saatavilla: https://www.syke.fi/fi-FI/Tutkimus_kehittami

[nen/Tutkimus ja kehittämishankkeet/Hankkeet/Jatepohjaisten liikennebiopolttoaineiden sekä puujätteiden LCAtarkastelut JalkiPuu](#) [viitattu 14.10.2021].

Paroc. s.a. REWOOL saa kivivillan kiertämään. WWW-artikkeli. Saatavissa: <https://www.paroc.fi/kampanjat/rewool> [viitattu 6.12.2021].

PEFC. s.a. Usein kysyttyä. WWW-sivu. Saatavissa: <https://pefc.fi/useinkysytya/> [viitattu 25.11.2021].

Puuinfo. 2019. Puutavaraopas. PDF-dokumentti. Saatavissa: https://puuinfo.fi/wp-content/uploads/2020/06/Puutavaraopas_2019_netti.pdf [viitattu 14.10.2021].

Puuinfo. 2020 a. Puuhun sitoutuu hiiltä. WWW-artikkeli Saatavissa: <https://puuinfo.fi/puutieto/ymparistovaikutukset/puuhun-sitoutuu-hiilta/> [viitattu 14.10.2021].

Puuinfo. 2020 b. Puutieto. WWW-artikkeli. Saatavissa: <https://puuinfo.fi/puutieto/ymparistovaikutukset/> [viitattu 14.10.2021].

Puuinfo. 2020 c. Puun käytön ympäristövaikutukset. WWW-artikkeli. Saatavissa: <https://puuinfo.fi/puutieto/ymparistovaikutukset/puutuotteiden-valmistus-tuottaa-enemman-energiaa-kuin-kuluttaa/> [viitattu 14.10.2021].

Puuteollisuus. 2021. Puun kiertotalous. WWW-artikkeli. Saatavissa: <https://puutuoteollisuus.fi/juuri-nyt/kiertotalous> [viitattu 14.10.2021].

Rakennusteollisuus. s.a. Rakennettu ympäristö ja ilmastonmuutos. WWW-sivu. Saatavissa <https://www.rakennusteollisuus.fi/Tietoa-alasta/Ilmasto-ymparisto-ja-energia/Materiaalitehokkuus/> [viitattu 14.10.2021].

Rakennusteollisuus. s.a. Rakennuksen elinkaari kestävän rakentamisen lähtökohtana. WWW-artikkeli. Saatavissa: <https://www.rakennusteollisuus.fi/Tietoa-alasta/Ilmasto-ymparisto-ja-energia/Kestava-rakentaminen/Rakennuksen-elinkaari/> [viitattu 19.10.2021].

Rakennustieto. 2019. Rakennustöiden menekit 2020 E-kirja. Saatavissa: <https://kaakkuri.finna.fi/> [viitattu 20.11.2021].

RT 36-10689. 1999. Mineraalivillaeristeet.

RT 36-11090. 2012. Puukuitueristeet.

Saint-Gobain. s.a. Kipsi kiertämään. WWW-artikkeli. Saatavissa: <https://www.saint-gobain.fi/tarinat/artikkelit/kipsi-kiertamaan> [viitattu 14.10.2021].

SSAB. s.a. Teräksen tuotanto. WWW-artikkeli. Saatavissa: <https://www.ssab.fi/ssab-konserni/kestava-kehitys/kestavat-toiminnot/terak-sen-tuotanto> [viitattu 14.10.2021].

Suomen standardisoimisliitto SFS. 2011. SFS-EN 15978 [viitattu 20.11.2021]

Tampereen teknillinen yliopisto. s.a. , Ilmääneneristysluku sekä standardisoitu ja normalisoitu äänitasoeroluku huoneistojen välisen ilmastueneristävyyden kuvaajina. PDF-dokumentti. Saatavissa: https://www.akustinen-seura.fi/wp-content/uploads/2015/09/AP2015_Paperin_palautus_10.pdf [viitattu 25.11.2021].

Teräsrakenneyhdistys. s.a. Teräksen kierrättäminen. WWW-artikkeli. Saatavissa: <https://www.terasrakenneyhdistys.fi/fin/teras/co2-ja-kiertotalous/kier-ratys/> [viitattu 14.10.2021].

Uutiskeskus. 2014. Suurtehoimurointi mahdollistaa rakennuseristeiden uusiokäytön. WWW-artikkeli. Saatavissa: <https://www.uutiskeskus.fi/suurtehoimurointi-mahdollistaa-rakennuseristeiden-uusiokayton/> [Viitattu 6.12.2021].

Väisänen, P. 2007. Teräs: Perustietoa arkkitehtiopiskelijalle. PDF-dokumentti. Saatavissa: http://www.terasrakenneyhdistys.fi/document/1/40/66e53a5/Te-ras_web.pdf [viitattu 6.12.2021].

Ympäristöministeriö. 2019. Rakennuksen vähähiilisyyden arviointimenetelmä. WWW-artikkeli. Saatavissa: https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/161761/YM_2019_22_Rakennuksen_vahahiilisyyden_arviointimenetelma.pdf?sequence=1&isAllowed=y [viitattu 19.10.2021].

Ympäristöministeriö. s.a. Puurakentamisen ohjelma. WWW-artikkeli. Saatavissa: <https://ym.fi/puurakentaminen> [viitattu 18.12.2021].

Ympäristöministeriö. s.a. Rakentamisen kiertotalous. WWW-artikkeli. Saatavissa: <https://ym.fi/rakentamisen-kiertotalous> [viitattu 14.10.2021].

Ököbaudat. s.a. Sustainable Construction Information Portal. WWW-sivu. Saatavissa: <https://www.oekobaudat.de/en.html> [viitattu 6.12.2021].

Metallirunkoinen väliseinä

Runko k600 + levytyt	koko	Saavutus työvuorossa	1 ram/h	Seinä määrä	pienennyskerroin	kesto	kesto, kerrottu t3	t13	t4
	2 RAM	14 m ² / tv	0,9 m ²	520 m ²	1	592,80 tth	592,80 tth	1,15	681,72 tth
	Väliseinän villoitus	2 RAM	160 m ² / tv	10 m ²	520 m ²	0,95	52,00 tth	49,40 tth	1,2
Pintakäsittely	2 RAM	88 m ² / tv	5 m ²	1040 m ²	1	189,28 tth	189,28 tth	1,2	227,14 tth
Ovi asennus	koko	Saavutus työvuorossa	1 ram/h	Ovien määrä	pienennyskerroin	kesto	kesto, kerrottu t3	t13	t4
1 RAM	18,60 kpl / tv	2,33	15	1	6,45 tth	6,45 tth	1,15	7,4175 tth	
Lasiseinät	koko	Saavutus työvuorossa	1 ram/h	Lasiseinien määrä	pienennyskerroin	kesto	kesto, kerrottu t3	t13	t4
2 RAM	7 m ² / tv	0,4 m ²	150 m ²	1	342,86 tth	342,86 tth	1,2	411,43 tth	
Listoitus	koko	Saavutus työvuorossa	1 ram/h	Jm määrä	pienennyskerroin	kesto	kesto, kerrottu t3	t13	t4
1 RAM	87,91 jm	10,99	159 jm	1,1	14,469 tth	15,9159 tth	1,2	19,09908 tth	
								Σ=	2281,97 tth

Puurunkoinen väliseinä

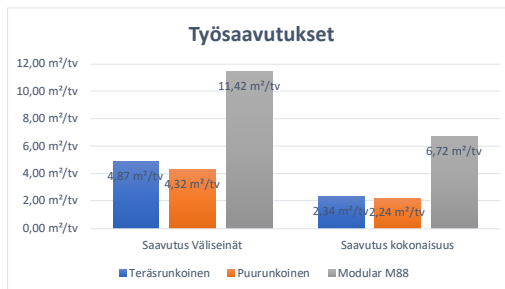
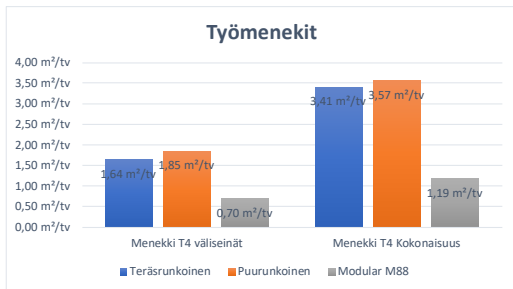
Runko k600 + levytyt	koko	Saavutus työvuorossa	1 ram/h	Seinä määrä	pienennyskerroin	kesto	kesto, kerrottu t3	t13	t4
	2 RAM	12 m ² / h	0,8 m ²	520 m ²	1	686,40 tth	686,40 tth	1,15	789,36 tth
	Väliseinän villoitus	2 RAM	160 m ² / h	10 m ²	520 m ²	0,95	52,00 tth	49,40 tth	1,2
Pintakäsittely	2 RAM	88 m ² / h	5 m ²	1040 m ²	1	189,28 tth	189,28 tth	1,2	227,14 tth
Ovi asennus	koko	Saavutus työvuorossa	1 ram/h	Ovien määrä	pienennyskerroin	kesto	kesto, kerrottu t3	t13	t4
1 RAM	18,60 kpl / tv	2,33	15	1	6,45 tth	6,45 tth	1,15	7,4175 tth	
Lasiseinät	koko	Saavutus työvuorossa	1 ram/h	Lasiseinien määrä	pienennyskerroin	kesto	kesto, kerrottu t3	t13	t4
2 RAM	7 m ² / tv	0,4 m ²	150 m ²	1	342,86 tth	342,86 tth	1,2	411,43 tth	
Listoitus	koko	Saavutus työvuorossa	1 ram/h	Jm määrä	pienennyskerroin	kesto	kesto, kerrottu t3	t13	t4
1 RAM	87,91 jm	10,99	159 jm	1,1	14,469 tth	15,9159 tth	1,2	19,09908 tth	
								Σ=	2389,61 tth

Modular M88 väliseinäelementti

Ylä- ja alakiskot	koko	Saavutus työvuorossa	Saavutus / h	Kiskojen määrä	Saavutus 1ram/h	kesto T4			
2 RAM	39,75 jm / tv	4,97 jm/h	318 jm	1,24 jm/tth	128,00 tth				
Elementtien asennus	3 RAM	Saavutus työvuorossa	Saavutus / h	Määrä	1 ram/h	Kesto T4			
		41,28 m ² /tv	5,16 m ² / h	1040 m ²	1,72 m ²	604,65 tth			
Ovi asennus	koko	Saavutus työvuorossa	Saavutus / h	Ovien määrä	pienennyskerroin	kesto	kesto, kerrottu t3	t13	t4
1 RAM	18,60 kpl / tv	2,33	15	1	6,45 tth	6,45 tth	1,15	7,4175 tth	
Lasiseinät	koko	Saavutus työvuorossa	Saavutus / h	Lasiseinien määrä	1 ram/h	kesto T4		Modular	
2 RAM	41,28 m ² /tv	5,16 m ²	150 m ²	2,58 m ²	58,14 tth			Σ=	798,21 tth

Tulokset

	Menekki T4 väliseinät	Menekki T4 Kokonaisuus	Saavutus Väliseinät	Saavutus kokonaisuus
Teräsrunkoinen	1,64 m ² /tv	3,41 m ² /tv	4,87 m ² /tv	2,34 m ² /tv
Puurunkoinen	1,85 m ² /tv	3,57 m ² /tv	4,32 m ² /tv	2,24 m ² /tv
Modular M88	0,70 m ² /tv	1,19 m ² /tv	11,42 m ² /tv	6,72 m ² /tv
	M88	Puu	Teräs	
	798,21 tth	2281,97 tth	2389,61 tth	
	1,19 tth/m ²	3,57 tth	3,41 tth/m ²	



M88 väliseinäelementti						
Tuote	Paksuus	Tilavuuspaino	Paino/m ²	GWP A1-A3	Hukkakerroin	Menekki kiloissa
Puukuitulevy	Poistettu	700 kg/m ³	8,40 kg/m ²	0,39 kg CO ₂ e/kg	1,05	8,82 kg/m ²
LVL	Poistettu	440 kg/m ³	1,830 kg/m ²	0,36 kg CO ₂ e/kg	1,05	1,92 kg/m ²
Kivivilla	Poistettu	30 kg/m ³	1,48 kg/m ²	1,50 kg CO ₂ e/kg	1,03	1,52 kg/m ²
Puukuitulevy	Poistettu	700 kg/m ³	8,40 kg/m ²	0,39 kg CO ₂ e/kg	1,05	8,82 kg/m ²
			20,11 kg/m ²			21,08 kg/m ²

Tuote	Konservatiivisen arvonkerroin	GWP A1-A3 rakennuslupaa varten	GWP A1-A3	D	D/m ²
Puukuitulevy	1,2	0,47 kg CO ₂ e/kg	4,13 kgCO ₂ e/m ²	-1,60 kg CO ₂ e/kg	-13,44 kgCO ₂ e/m ²
LVL	1,2	0,43 kg CO ₂ e/kg	0,83 kgCO ₂ e/m ²	-1,60 kg CO ₂ e/kg	-2,93 kgCO ₂ e/m ²
Kivivilla	1,2	1,80 kg CO ₂ e/kg	2,73 kgCO ₂ e/m ²	0,00 kg CO ₂ e/kg	0,00 kgCO ₂ e/m ²
Puukuitulevy	1,2	0,47 kg CO ₂ e/kg	4,13 kgCO ₂ e/m ²	-1,60 kg CO ₂ e/kg	-13,44 kgCO ₂ e/m ²
			11,82 kgCO ₂ e/m ²		-29,81 kg CO ₂ e/kg/m ²

Tuote	Tuotepaino/m ²	Menekkipaino/m ²	kg CO ₂ e/kg/m ²	D
Puukuitulevy	16,80 kg/m ²	17,64 kg/m ²	8,26 kg CO ₂ e/kg/m ²	-26,88 kgCO ₂ e/m ²
LVL	3,66 kg/m ²	1,92 kg/m ²	0,83 kg CO ₂ e/kg/m ²	-5,86 kgCO ₂ e/m ²
Kivivilla	2,95 kg/m ²	1,52 kg/m ²	2,73 kg CO ₂ e/kg/m ²	0,00 kgCO ₂ e/m ²
Σ=	23,41 kg/m ²	21,08 kg/m ²	11,82 kg CO ₂ e/kg/m ²	-32,74 kg CO ₂ e/kg/m ²

	Yksielementti	Tuplaelementti
Hiilijalanjälki GWP A1-A3	11,82 kgCO ₂ e/m ²	23,64 kgCO ₂ e/m ²
Hiilikädenjälki D	-29,81 kgCO ₂ e/m ²	-59,62 kgCO ₂ e/m ²
Tase	-17,99 kgCO ₂ e/m ²	-35,98 kgCO ₂ e/m ²

Teräsrunkoinen väliseinä						
Tuote	Paksuus	Tilavuuspaino	Paino/m ²	GWP A1-A3	Hukkakerroin	Menekki kiloissa
Gyproc habito	12,50 mm	670 kg/m ³	8,38 kg/m ²	0,26 kg CO ₂ e/kg	1,05	8,79 kg/m ²
Gyproc XR95 k6	0,46 mm	363 kg/m ³	1,310 kg/m ²	2,90 kg CO ₂ e/kg	1,05	1,38 kg/m ²
Isover Acoustic	66,00 mm	20 kg/m ³	1,32 kg/m ²	1,00 kg CO ₂ e/kg	1,03	1,36 kg/m ²
Gyproc habito	12,50 mm	670 kg/m ³	8,38 kg/m ²	0,26 kg CO ₂ e/kg	1,05	8,79 kg/m ²
			19,38 kg/m ²			20,32 kg/m ²

Tuote	Konservatiivisen arvonkerroin	GWP A1-A3 rakennuslupaa varten	GWP A1-A3	D	D/m ²	
Gyproc habito	1,2	0,31 kg CO ₂ e/kg	2,74 kgCO ₂ e/m ²	0,00 kg CO ₂ e/kg	0,00 kgCO ₂ e/m ²	
Gyproc XR95 k6	1,2	3,48 kg CO ₂ e/kg	4,79 kgCO ₂ e/m ²	-1,60 kg CO ₂ e/kg	-2,10 kgCO ₂ e/m ²	
Isover Acoustic	1,2	1,20 kg CO ₂ e/kg	1,63 kgCO ₂ e/m ²	0,00 kg CO ₂ e/kg	0,00 kgCO ₂ e/m ²	
Gyproc habito	1,2	0,31 kg CO ₂ e/kg	2,74 kgCO ₂ e/m ²	0,00 kg CO ₂ e/kg	0,00 kgCO ₂ e/m ²	
			11,91 kgCO ₂ e/m ²			-2,10 kg CO ₂ e/kg/m ²

	Tuotepaino/m ²	Menekkipaino/m ²	kg CO ₂ e/kg/m ²	D
Gyproc habito	16,75 kg/m ²	17,59 kg/m ²	5,49 kg CO ₂ e/kg/m ²	0,00 kg CO ₂ e/kg/m ²
Gyproc XR95 k600	1,310 kg/m ²	1,38 kg/m ²	4,79 kgCO ₂ e/m ²	-2,10 kg CO ₂ e/kg/m ²
Isover Acoustic	1,32 kg/m ²	1,36 kg/m ²	1,63 kgCO ₂ e/m ²	0,00 kg CO ₂ e/kg/m ²
Σ=	19,38 kg/m ²	20,32 kg/m ²	11,91 kgCO ₂ e/m ²	-2,10 kgCO ₂ e/m ²

Hiilijalanjälki GWP A1-A3	11,91 kg CO ₂ e/kg/m ²
Hiilikädenjälki D	-2,10 kg CO ₂ e/kg/m ²
Tase	9,81 kg CO ₂ e/kg/m ²

Puurunkoinen väliseinä						
Tuote	Paksuus	Tilavuuspaino	Paino/m ²	GWP A1-A3	Hukkakerroin	Menekki kiloissa
Kipsilevy	12,50 mm	670 kg/m ³	8,38 kg/m ²	0,26 kg CO ₂ e/kg	1,05	8,79 kg/m ²
Kipsilevy	12,50 mm	670 kg/m ³	8,38 kg/m ²	0,26 kg CO ₂ e/kg	1,05	8,79 kg/m ²
LVL	66,00 mm	440 kg/m ³	1,888 kg/m ²	0,36 kg CO ₂ e/kg	1,05	1,98 kg/m ²
Lasivilla	70,00 mm	20 kg/m ³	1,40 kg/m ²	1,50 kg CO ₂ e/kg	1,03	1,44 kg/m ²
Kipsilevy	12,50 mm	670 kg/m ³	8,38 kg/m ²	0,26 kg CO ₂ e/kg	1,05	8,79 kg/m ²
Kipsilevy	12,50 mm	670 kg/m ³	8,38 kg/m ²	0,26 kg CO ₂ e/kg	1,05	8,79 kg/m ²
			36,79 kg/m ²			38,60 kg/m ²

Tuote	Konservatiivisen arvonkerroin	GWP A1-A3 rakennuslupaa varten	GWP A1-A3	D	D/m ²	
Kipsilevy	1,2	0,31 kg CO ₂ e/kg	2,74 kgCO ₂ e/m ²	0,00 kg CO ₂ e/kg	0,00 kgCO ₂ e/m ²	
Kipsilevy	1,2	0,31 kg CO ₂ e/kg	2,74 kgCO ₂ e/m ²	0,00 kg CO ₂ e/kg	0,00 kgCO ₂ e/m ²	
LVL	1,2	0,43 kg CO ₂ e/kg	0,86 kgCO ₂ e/m ²	-1,60 kg CO ₂ e/kg	-3,02 kgCO ₂ e/m ²	
Lasivilla	1,2	1,80 kg CO ₂ e/kg	2,60 kgCO ₂ e/m ²	0,00 kg CO ₂ e/kg	0,00 kgCO ₂ e/m ²	
Kipsilevy	1,2	0,31 kg CO ₂ e/kg	2,74 kgCO ₂ e/m ²	0,00 kg CO ₂ e/kg	0,00 kgCO ₂ e/m ²	
Kipsilevy	1,2	0,31 kg CO ₂ e/kg	2,74 kgCO ₂ e/m ²	0,00 kg CO ₂ e/kg	0,00 kgCO ₂ e/m ²	
			14,43 kgCO ₂ e/m ²			-3,02 kg CO ₂ e/kg/m ²

Tuote	Tuotepaino/m ²	Menekkipaino/m ²	kg CO ₂ e/kg/m ²	D
Kipsilevy	33,50 kg/m ²	35,18 kg/m ²	10,97 kgCO ₂ e/m ²	0,00 kg CO ₂ e/kg
LVL	1,89 kg/m ²	1,98 kg/m ²	0,00 kgCO ₂ e/m ²	-3,02 kg CO ₂ e/kg
Lasivilla	1,40 kg/m ²	1,44 kg/m ²	0,00 kgCO ₂ e/m ²	0,00 kg CO ₂ e/kg
Σ=	36,79 kg/m ²	38,60 kg/m ²	10,97 kgCO ₂ e/m ²	-3,02 kgCO ₂ e/m ²

Hiilijalanjälki GWP A1-A3	10,97 kgCO ₂ e/m ²
Hiilikädenjälki D	-3,02 kgCO ₂ e/m ²
Tase	7,95 kgCO ₂ e/m ²



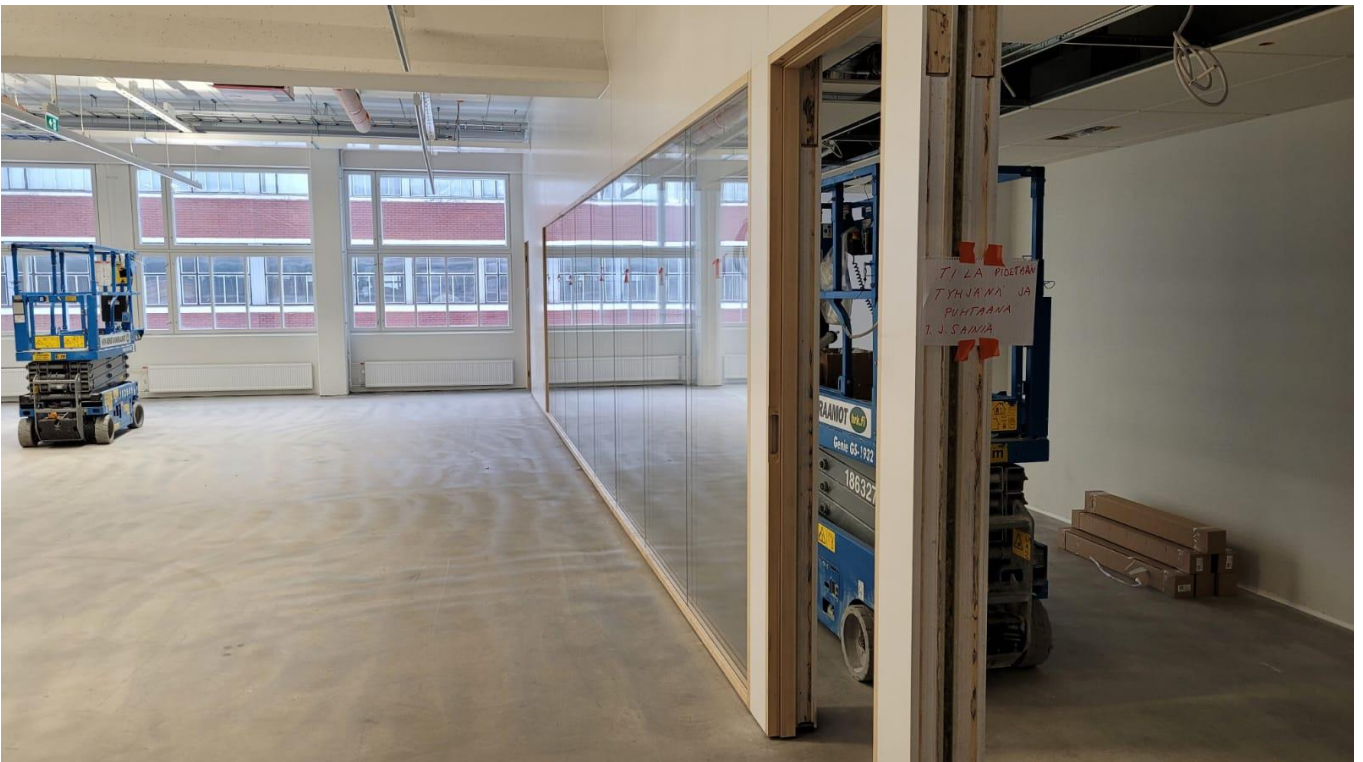
Liite 3 kuva 1 Valmista seinää, jossa rakennusaikainen suojapahvi paikallaan



Liite 3 kuva 2 Modular seinä- ja kattoelementeillä toteutettu toimistohuone



Kuva 3 Pakattuja elementtejä odottamassa asentamista



Kuva 4 Lasitettu seinää. Seinän yläosa tehty Modular ripustetuilla Modular elementeillä