

Mika Keskisalo & Mikko Matveinen

# Opas rakennushankkeiden päästöjen hallintaan

- Kohti vähähiilistä rakentamista
- Joensuu Wood City -projekti



Karelia-ammattikorkeakoulun julkaisuja  
B: 67

# **Opas rakennushankkeiden päästöjen hallintaan**

Kohti vähähiilistä rakentamista  
– Joensuu Wood City -projekti

Mika Keskisalo & Mikko Matveinen

*Julkaisusarja*

B, Oppimateriaaleja ja kokoomateoksia: 67

*Julkaisusarjan  
vastaava toimittaja*

Kari Tiainen

*Taitto*

*Pasi Tikka, Osuuskunta Mekastamo*

*Tekijät*

Mika Keskisalo & Mikko Matveinen

© Tekijät ja Karelia-ammattikorkeakoulu



Tämä julkaisu on lisensoitu Creative Commons Nimeä-EiKaupallinen-JaaSamoin 4.0 Kansainvälinen -lisenssillä.

ISBN 978-952-275-317-5 (painettu)  
ISBN 978-952-275-318-2 (verkkajulkaisu)  
ISSN- L 2323-6876  
ISSN 2323-6876

Karelia-ammattikorkeakoulu  
Joensuu  
julkaisut@karelia.fi

# Sisällys

<b>ESIPUHE</b>	<b>7</b>
<b>TERMISTÖ</b>	<b>9</b>
<b>1 JOHDANTO</b>	<b>11</b>
1.1 Rakentamisen päästöt ja niiden ohjaus	11
1.2 Kohti vähähiilistä rakentamista – Joensuu Wood City -projekti	12
1.3 Oppaan tarkoitus	12
<b>2 Rakentamisen päästöjen laskenta ja arviointimenetelmät</b>	<b>13</b>
2.1 Rakennusten elinkaaritarkastelu	13
2.2 Arviointimenetelmät	15
2.2.1 EU Level(s)	15
2.2.2 Ympäristöministeriön arviointimenetelmä	16
2.3 Rakentamisen elinkaariarviointi	16
2.3.1 Elinkaariarvioinnin vaiheet	16
2.3.2 Arviointityökalut	17
2.3.3 Arvioinnin tekijältä vaadittavat pätevyudet	18
2.3.4 Päästötiedot	19
2.3.5 Tietomallinnus päästölaskennan mahdollistajana	20
2.3.6 Päästöjen vertailu	20
2.3.7 Hiilijalanjälkiarvioinnin tulokseen vaikuttavat epävarmuustekijät ja luotettavuuden arviointi	21

### **3 Rakennerratkaisujen vertailu päästöjen näkökulmasta** ..... **24**

3.1	Esimerkkikohteiden vertailu .....	24
3.1.1	Hankkeessa arvioitujen kohteiden tiedot .....	26
3.1.2	Arvioinnin suorittamisen periaatteet ja rajaukset .....	27
3.1.3	EU Level(s) arviointimenetelmän mukaiset tulokset kohteille .....	28
3.1.4	Ympäristöministeriön arviointimenetelmän mukaiset tulokset kohteille .....	30
3.1.5	Arviointimenetelmien erot tuloksien osalta .....	31
3.2	Rakennerratkaisujen vertailu päästöjen näkökulmasta .....	32
3.2.1	Joensuu Wood City -konsepti .....	32
3.2.2	Rakennusosakohtainen arviointi luonnosvaiheessa .....	35
3.3	Energia- ja energiatehokkuus .....	47
3.3.1	Lämmitys- ja jäähdytysjärjestelmät .....	48
3.3.2	Ilmanvaihto .....	48
3.3.3	Energiavertailutulokset .....	49
3.3.4	Energiatehokkuussuunnittelun toimenpiteet .....	53
3.4	Hiilijalanjäljen vertailu (GWP) .....	54

### **4 Käytännön työkaluja rakennusten hiilijalanjäljen optimoimiseksi** ..... **65**

4.1	Rakentamisen ympäristöindikaattorit maankäyttösopimuksissa .....	65
4.2	Hiilijalanjäljen pienentämiskeinoja rakennuksen elinkaaren eri vaiheissa .....	66
4.3	Rakennuksen muotokerroin vähähiilisyyden arvioimiseksi tarve- ja hankesuunnitteluvaiheessa .....	69

4.3.1	Painotettu muotokerroin apuna elinkaaren vaiheen A1-3 arvioinnissa .....	71
4.3.2	Pinta-aloihin perustava alustava hiilijalanjälkiarvio rakennuskohteelle .....	71
4.4	Tietojen ilmoittaminen suunnitteludokumenteissa .....	76
4.5	Tuotteiden päästöarvot ja niiden valinta .....	77
4.5.1	Maantieteellinen edustavuus .....	78
4.5.2	Teknologinen edustavuus .....	79
4.5.3	Ajallinen edustavuus .....	80
4.6	Rakennuksen rakenteellisen tehokkuuden arviointi rakennesuunnittelussa .....	81
4.7	Rakennuksessa vaikuttavien voimien (Newton) hiilijalanjäljen mukainen vertailu .....	84
4.8	Kantavien rakennusosien optimointi - vaakarakenteet .....	85
4.8.1	Esimerkki välipohjan vaikutuksesta rakennekokonaisuuteen .....	87
4.9	Rakenteiden hiilijalanjäljenvertailu teknisten ominaisuuksien perusteella .....	88
4.10	Lämmönjohtavuus, lämmöneristävyys sekä palonkesto .....	88
4.11	Raudoituksen määräarviointi ja keskimääräiset arvot (kg/m <sup>3</sup> ) .....	91
<b>4</b>	<b>Pohdinta .....</b>	<b>95</b>
	<b>Lähteet .....</b>	<b>97</b>

# Esipuhe

Vuonna 2014 Karelia-ammattikorkeakoulu valitsi yhdeksi painopistealueekseen puurakentamisen osaamisen kehittämisen. Siitä lähtien puurakentamiseen liittyvää osaamista on kehitetty suunnitelmallisesti osana rakennustekniikan koulutusvastuun (Insinööri-amk) toimintaa. Maakunnallisen elinkeinorakenteen lisäksi painopistealueen valintaan vaikuttivat ilmastonmuutoksen hillintä potentiaalisten teknologioiden edistämisen kautta.

Ympäristöministeriö on parhaillaan sisällyttämässä rakennusten elinkaaren hiilijalanjäljen arviointia osaksi rakennusmääräyksiä. Meneillään oleva säädöskehitys ja sekä tarve ymmärtää paremmin rakentamisessa käytettävien eri materiaalien päästöjä loivat tarpeen käynnistää Kohti vähähiilistä rakentamista – Joensuu Wood City -projektin osana Karelia-ammattikorkeakoulun puurakentamiseen liittyvää tutkimus- ja kehittämistoimintaa.

Kohti vähähiilistä rakentamista – Joensuu Wood City -projekti on myös mahdollistanut konkreettisen kehityskaaren Karelia-ammattikorkeakoulun organisaatiossa. Karelia on ensimmäisten ammattikorkeakoulujen joukossa ottanut rakennusten elinkaaren hiilijalanjäljen arvioinnin osaksi koulutustarjontaansa. Lisäksi Karelia-ammattikorkeakoulun uudessa kymmenvuotisessa strategiassa ”Hiilineutraalit ratkaisut!” on nostettu yhdeksi viidestä strategian kärkiteemoista. Teemaan liittyvissä toimenpiteissä rakennus- ja talotekniikan insinöörikoulutukset ovat avainasemassa.

Tämäkään kehittämisprojekti ei olisi ollut mahdollista ilman yhteistyökumppaneiden sitoutumista ja taloudellista tukea. Haluankin kiittää yhteistyökumppaneita koko projektitiimin puolesta. Kohti vähähiilistä rakentamista -projektin päärahoituksesta on vastannut Etelä-Savon ELY-keskus EAKR-ohjelmasta. Lisäksi projektin yhteistyökumppaneina ja osarahoittajina ovat toimineet Business Joensuu Oy sekä Pohjois-Karjalan kunnista Joensuu, Kontiolahti, Nurmes, Lieksa, Kitee ja Tohmajärvi. Kiitokset myös projektin ohjausryhmän toimintaan osallistuneille aktiivisista ja rakentavista keskusteluista. Erityiskiitos projektin toteutukseen osallistuneille Karelia-ammattikorkeakoulun opiskelijoille.

Mikko Matveinen,  
projektipäällikkö

Joensuussa 26.11.2020





# Termistö

## **BIM (Building Information Modelling), Rakennuksen tietomalli**

Rakennuksen ja rakennusprosessin koko elinkaaren aikaisten tietojen kokonaisuus digitaalisessa muodossa, mukaan lukien rakennuksen geometria kolmiulotteisessa muodossa.

## **CLT (Cross laminated timber)**

Ristikkäin liimatuista puulamellikerroksista koostuva massiivipuinen rakennuslevy.

## **CO<sub>2</sub>, Hiilidioksidi**

Kasvihuonekaasu ja kemiallinen yhdiste, joka koostuu hiilestä ja hapesta.

## **CO<sub>2</sub>e, Hiilidioksidiekvivalentti**

Hiilijalanjäljen yksikkö, jossa eri kasvihuonekaasujen ilmastoa lämmittävä vaikutus on muunnettuna hiilidioksidin vastaavaksi vaikutukseksi ilmakehässä.

## **DLT (Dowel laminated timber)**

Samansuuntaisista puulamellikerroksista koostuva massiivipuinen rakennuslevy, joka on koottu vaarnoilla.

## **EPD (Environmental Product Declaration), ympäristöseloste**

Elinkaarianalyysiin perustuva standardoitu tapa esittää jonkin valmistettun tuotteen tai tuoteryhmän varmennetut ja vertailukelpoiset ympäristövaikutukset.

## **Elinkaaren hiilijalanjälki**

Hiilijalanjälki, joka kattaa koko elinkaaren ilmastovaikutukset. Rakennuksen osalta elinkaaren hiilijalanjälki kattaa ilmastopäästöt tuotteiden valmistuksesta, rakentamisesta, rakennuksen käytöstä, huolloista ja energian kulutuksesta sekä rakennuksen purusta.

## **GWP (Global Warming Potential), Lämmityspotentiaali**

Lämmityspotentiaali joka kertoo kuinka massayksikkö kyseistä kaasua sitoo lämpöenergiaa ilmakehään tietyksi ajanjaksoksi suhteessa hiilidioksidiin (CO<sub>2</sub>).

## **Hiilijalanjälki**

Kuvaa tuotteen tai palvelun ilmastovaikutusta muunnettuna hiilidioksidiekvivalenteiksi.

## **Hiilikädenjälki**

Tuotteesta tai palvelusta syntyvien ilmastohyötyjen summa muunnettuna hiilidioksidiekvivalenteiksi. Ympäristöministeriön Vähähiilisuuden arviointimenetelmässä hiilikädenjäljellä tarkoitetaan koko elinkaaren aikana syntyviä absoluuttisia päästöhyötyjä, joita ei syntyisi ilman rakennushanketta. Muissa määritelmässä hiilikädenjäljellä voidaan kuvata myös esimerkiksi positiivista ilmastohyötyä verrattuna tuotetta tai palvelua vastaavaan, tavallisen tason tuotteeseen tai palveluun.

## **Hiilivarasto**

Tuotteeseen tai materiaaliin ilmakehästä varastoitunut hiili.

**LCA (Life cycle assessment), Elinkaariarviointi**

Tuotteen tai palvelun elinkaaren ympäristövaikutusten arviointimetodologia, jossa voidaan huomioida useita eri ympäristövaikutusvaikutusluokkia, mukaan lukien hiilijalanjälki.

**LCI (Life Cycle Inventory), Inventaarioanalyysi**

Elinkaariarvioinnin tiedonkeruuvaihe, jossa eritellään tuotteeseen tai toimintaan liittyvät materiaali- ja energiavirrat raaka-aineiden käyttönä ja ympäristövaikutuksina.

**LCIA (Life Cycle Inventory Analysis), Vaikutusarviointi**

Elinkaariarvioinnin arviointivaihe, jossa inventaarioanalyysissä kerätyt tiedot luokitetaan, kuvataan ja arvioidaan.

**LVL (Laminated veneer lumber)**

Suomeksi "viilupuu" on useista ohuista havupuuviiluista liimattu levy tai palkkimainen teollinen puutuote.

**NLT (Nail laminated timber)**

Samansuuntaisista puulamelleroksista koostuva massiivipuinen rakennuslevy, joka on koottu puutapeilla, ruuveilla tai nautoilla.

**Rakennuksen elinkaari**

Kattaa rakennuksen kaikki vaiheet raaka-aineiden ja tuotteiden hankinnasta aina rakennuksen purkuun saakka. Elinkaari jaetaan neljään vaiheeseen: tuotevaihe, rakennusvaihe, käyttövaihe ja elinkaaren loppu.

**Rakennusjärjestelmä**

Rakennusjärjestelmällä tarkoitetaan kokonaisuutta, joko muodostuu rakennuksen kantavista ja tiloja rajaavista rakennusosista. Erona runkojärjestelmään sen on laajempi kokonaisuus, ja siihen kuuluvat mm. ei kantavat ulkoseinät ja osastoivat väliseinät.

**Rakennusosa**

Rakennusosalla tarkoitetaan rakennukseen kiinteästi liittyviä osia kuten ovia, ikkunoita parvekkeita, perustuksia tai muita rakentamisessa käytettäviä osia, kuten seinä ja välipohjaelementtejä.

**Runkojärjestelmä**

Rakennuksen kantavien ja jäykistävien rakennusosien muodostama kokonaisuus.

# 1 Johdanto

## 1.1 Rakentamisen päästöt ja niiden ohjaus

**E**uroopan tasolla rakentaminen kuluttaa kaikista luonnonvaroista jopa 50% painon mukaan mitattuna. Rakennukset kuluttavat n. 40% energiasta ja tuottavat 36% hiilidioksidipäästöistä. Lisäksi rakentamisen jätteet ja rakennusten purkujätteet tuottavat 25-30% kaikista jätteistä. Rakennusmateriaalien osuus rakennusten elinkaaren hiilijalanjäljestä on jo nykyisellään merkittävä, ja se kasvaa entisestään rakennusten energiatehokkuuden parantuessa ja energijärjestelmän kehittyessä.

Rakennuskanta on suurimpia päästöjen aiheuttajia, ja rakentaminen tehokkaimpia sektoreita vähentää niitä. Euroopassa rakennusmateriaalien päästöjen normiohjaukseen on jo siirrytty Ranskassa, Hollannissa ja Belgiassa. Lisäksi vapaaehtoisuuteen pohjautuvaa päästöohjausta tehdään mm. Sveitsissä ja Itävallassa. Myös Suomi on kansainvälisten ilmastopimusten ja Euroopan unionin kautta sitoutunut merkittäviin kasvihuonekaasupäästövähennyksiin. Euroopan komissio onkin linjannut, että vuoteen 2050 mennessä kansallisten päästöjen osuuden tulisi pienentyä 80 % verrattuna 1990 luvun päästöihin EU:n alueella. Päästövähennyksen koskevat kaikkien sektorien kokonaisuutta sisältäen niin asumisesta, liikenteestä, teollisuudesta kuin energiantuotannostakin aiheutuvat päästöt. (COM 2011)

Suomessa ympäristöministeriö on parhaillaan laatimassa kansallisia raja-arvoja rakennusten elinkaaren hiilijalanjäljelle (CO<sub>2</sub>e). Rakennusten elinkaaren hiilijalanjäljellä viitataan rakennuksen koko elinkaarensa aikana aiheuttamiin kasvihuonekaasupäästöihin, joiden laskenta perustuu yleisesti EN 15978-standardiin (Huuhtanen ym. 2020). Näiden raja-arvojen on tarkoitus tulla voimaan viimeistään vuonna 2025. Säädoskehityksen perimmäisenä tavoitteena on kannustaa vähäpäästöisten materiaalien sekä energian kulutuksen käytön vähentämiseen rakentamisessa.

Myös kuntien ja kaupunkien ohjaus on avainasemassa rakentamisen päästöjen vähentämisen suhteen. Kunnat ovatkin asettaneet omia ilmastotavoitteitaan päästöjen vähentämiseksi ja hiilineutraalisuuden saavuttamiseksi. Näitä tavoitteita on myös alettu soveltamaan rakentamiseen, esimerkiksi kannustamalla ympäristötehokkaaseen rakentamiseen tontinluovutusten yhteydessä.

## 1.2 Kohti vähähiilistä rakentamista – Joensuu Wood City -projekti

**K**arelia-ammattikorkeakoulu toteutti vuosina 2018–2020 kehittämishankkeen, jonka ensisijaisena tavoitteena oli vähähiiliseen rakentamiseen liittyvä osaamistason nousu Pohjois-Karjalan kuntien ja kaupunkien organisaatioissa sekä Karelia-ammattikorkeakoulun rakennustekniikan-, talotekniikan ja ympäristötekniikan koulutusalioilla.

Osaamisen siirron toimenpiteiden lisäksi yhtenä hankkeen keskeisenä toimenpiteenä oli elinkaaren päästölaskelmien tekeminen erityyppisille pilottikohteille. Pilottikohteet olivat rakenteilla olevia tai toteutuneita rakennuskohteita. Tehtyjen päästölaskelmien avulla voitiin muodostaa käsitys rakentamisen elinkaaripäästöille Pohjois-Karjalassa. Lisäksi pilottikohteet toimivat konkreettisina oppimisalustoina hankkeen toteuttajille sekä sen sidosryhmille.

Hankkeessa luotiin myös askelmerkit ja edellytykset vähähiiliselle kaupunkirakentamiselle kehitetyn Joensuu Wood City -konseptin avulla. Konsepti piti sisällään tyyppiasuinkerrostalon suunnittelun ja eri rakenneratkaisujen vertailun elinkaaren päästöjen näkökulmasta. Lisäksi sen avulla tarkasteltiin eri energiaratkaisujen vaikutusta rakennuksen elinkaaren päästöihin.

Projekti osallistui Ympäristöministeriön rakennusten hiilijalanjäljen arviointimenetelmän testaukseen ja kehittämiseen sekä Euroopan komission Level(s) arviointimenetelmän kehitystyöhön (Ympäristöministeriö 2020; Euroopan komissio 2020). Osallistumalla näihin kehittämisprosesseihin pyrittiin varmistamaan myös se, että aiheeseen liittyvä viimeisin tieto on hankkeen ja sen sidosryhmien käytettävissä.

## 1.3 Oppaan tarkoitus

**T**ämän oppaan tavoitteena on tarjota esimerkkejä ja näkökulmia maankäytön suunnittelijoille, rakennuttajille, suunnittelijoille sekä rakentajille siitä, miten vähähiilistä rakentamista voidaan konkreettisena edistää. Oppaaseen on koottu Kohti vähähiilistä rakentamista – Joensuu Wood City -hankkeen aihepiiriin liittyviä kokemuksia, tunnistettuja hyviä käytänteitä sekä kehitettyjä työkaluja.

Hiilijalanjäljen kannalta merkittävimmät vaiheet ovat tuotevaihe (rakennusmateriaalien valmistuksen päästöt) ja käytönaikainen energiankulutus. Eri laskentamenetelmien rajaukset ja säännöt kuitenkin vaikuttavat siihen, miten elinkaaren vaiheet painottuvat. (Huuhtanen ym. 2020). Tässä oppaassa keskitytään erityisesti rakennussuunnitteluun sekä rakenneteknisiin näkökulmiin, joilla rakennusten elinkaaren päästöjä voidaan pienentää.

Tämän oppaan ja kehittämishankkeen toteutuksen on mahdollistanut Etelä-Savon elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskus Euroopan aluekehitysrahastosta päärahoittajan roolissa. Lisäksi hankkeen osarahoitukseen ovat osallistuneet Business Joensuu, Joensuun, Lieksan, Nurmeksen ja Kiteen kaupungit sekä Kontiolahden ja Tohmajärven kunnat.

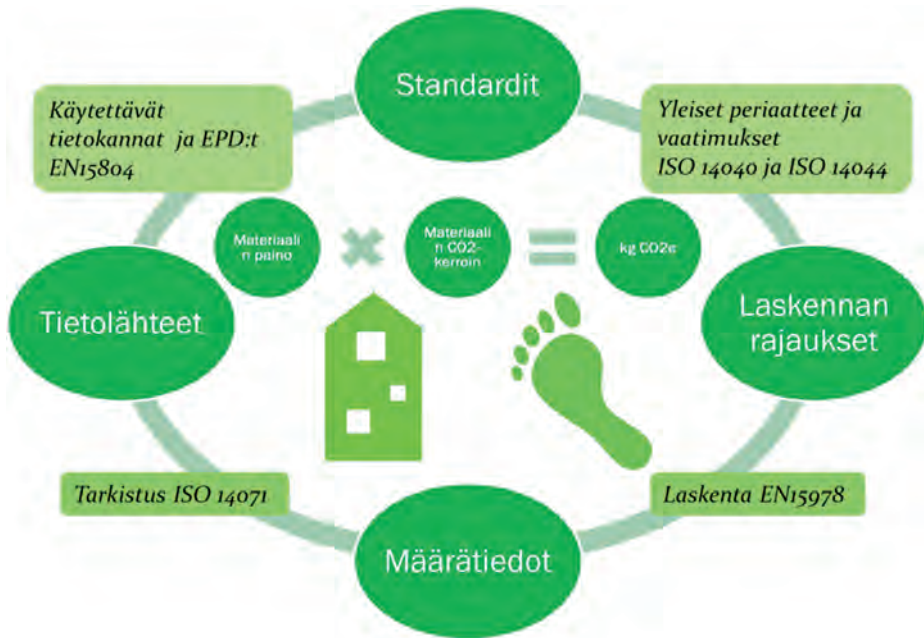
# 2 Rakentamisen päästöjen laskenta ja arviointimenetelmät

Tämä osio on tarkoitettu johdannoksi rakentamisen elinkaaren päästöjen laskemiseen ja siinä huomioitaviin asioihin. Rakennuksen vähähiilisyys arvioinnin suorittamiseksi tarvitaan hyväksytty arviointimenetelmä, työkalu päästöjen arviointiin sekä rakennustuotteiden päästötiedot.

## 2.1 Rakennusten elinkaaritarkastelu

Rakennuksen elinkaariarviointi pyrkii tarkastelemaan ja arvioimaan rakennuksen ympäristövaikutuksia sen koko elinkaaren aikana (Kuva 1.) aina rakennusmateriaalien valmistuksesta rakennuksen elinkaaren loppuun sekä loppukäyttöön saakka. Rakennuksen elinkaari voidaan kuvata standardin EN15978 mukaisesti. Elinkaaritarkastelussa laskenta perustuu EN- sekä ISO standardeihin. EN15978 kattaa LCA laskentamenetelmän sekä rajaussäännöt mm. tarkastelun ulkopuolelle jätettävien materiaalien osalta. ISO14044 ja ISO14071 taas toimivat tulosten arvioinnissa, jotta voidaan varmistaa arvioinnin läpinäkyvyys, johdonmukaisuus sekä käytettyjen menetelmien soveltuvuus. Standardi EN15978 antaa myös prosessikuvauksen elinkaariarvioinnin suorittamiseksi. Tällöin käytettyjen laskentamenetelmien välillä ei tulisi esiintyä suuria eroavaisuuksia, mikä on tärkeää tuloksien vertailun kannalta.

Rakennuksen elinkaaren vaiheet voidaan määritellä kuvan 2. mukaisesti. Hiilijalanjäljen kannalta merkittävimmät vaiheet ovat tuotevaihe A1-3 (rakennusmateriaalien valmistuksen päästöt) ja käytönaikainen energiankulutus B6. Eri laskentamenetelmien rajaukset ja säännöt kuitenkin vaikuttavat siihen, miten elinkaaren vaiheet painottuvat. (Huuhtanen ym. 2020). Vähentämällä päästöjä kyseisissä elinkaaren vaiheissa, voidaan saada merkittävimmät päästövähennykset. Hiilijalanjäljen vähentämiskeinoja rakennuksen elinkaaren eri vaiheissa on käsitelty tarkemmin luvussa 4.2.



Kuva 1. Rakennuksen elinkaariarvioinnissa hyödynnettävät ohjeet ja standardit.

A1-3	A4-5	B		C
Valmistusvaihe	Rakentamisvaihe	Käyttövaihe		Purkuvaihe
<b>A1</b> Raaka-aineen hankinta	<b>A4</b> Kuljetus työmaalle	<b>B1</b> Tuotteen käyttö	<b>B5</b> Laajamittaiset korjaukset	<b>C1</b> Purkaminen
<b>A2</b> Kuljetus valmistukseen	<b>A5</b> Työmaatoiminnot	<b>B2</b> Kunnossapito	<b>B6</b> Energian käyttö	<b>C2</b> Kuljetukset
<b>A3</b> Tuotteen valmistus		<b>B3</b> Korjaus	<b>B7</b> Veden käyttö	<b>C3</b> Purkujätteen käsittely
		<b>B4</b> Osien vaihto		<b>C4</b> Purkujätteen loppusijoitus
<b>D- Lisätiedot</b>				
Rakennuksen elinkaaren ulkopuolelle jäävät hyödyt tai haitat				

Kuva 2. Rakennuksen elinkaaren vaiheet (Ympäristöministeriö 2017))

## 2.2 Arviointimenetelmät

### 2.2.1 EU Level(s)

EU Level(s) on menetelmä rakennusten resurssitehokkuuden yhtenäiseen mittaamiseen. Menetelmä on kehitetty yhteistyössä EU:n jäsenmaiden ja rakentamisen ammattilaisten kanssa. EU Level(s) tavoitteena on yhtenäistää eri rakennusten vertailuperusteita käyttäen olemassa olevia EN- ja ISO standardeja, jolloin saatu tieto on vertailukelpoista sekä todennettavissa. Menetelmän tarkoituksena on antaa rakennushankkeen osapuolten käyttöön menetelmiä, joilla vähentää ympäristövaikutuksia ja antaa eväitä käyttää myös vaativampia arviointijärjestelmiä- sekä työkaluja. Tällöin Level(s) soveltuu käytettäväksi niin suunnittelijoiden, rakennusliikkeiden, kiinteistönhuollon, kiinteistösijoittajien kuin rakennusten omistajien ja käyttäjien työkaluna. (Dodd ym. 2017)

EU Level(s) arviointi voidaan toteuttaa käyttämällä kolmea eri arvioinnin tarkkuustasoa: yksinkertaistettu, vertaileva sekä yksityiskohtainen optimointi. Yksinkertaistettu tarkkuustaso soveltuu yleiseen rakennuksen suoritustason arviointiin ollen pelkistetty sekä alkuvaiheen vaikutusarvioinnin työkalu. Vertailevan tarkkuustason tarkoituksena on vertailla ominaisuuksiltaan yhteneväisiä rakennuksia ja pyrkiä tämän kautta tehostamaan valintoja tarkasteltavassa kohteessa. Yksityiskohtaisen optimoinnin tavoitteena on arviointi perustuen todennettuihin sekä mitattuihin tietoihin.

Tämän kautta tapahtuu eri toteutusvaihtoehtojen luonti suunnittelun sekä käyttövaiheen toiminnan tehostamiseksi sekä eri tulevaisuuden skenaarioiden luonti rakennuksen elinkaaren aikana (kustannukset, riskit ja mahdollisuudet). Tämä korostuu EU Level(s) ohjaustavassa, jossa arvioinnin suorittaja arvioi käytettyjen tietojen sekä elinkaariarvioinnin tekijän laatua ja luotettavuutta mittariluokakohtaisesti; tekninen, maantieteellinen, ajallinen luotettavuus sekä epävarmuustekijöiden huomioinen. Luokitusasteikkona käytetään neliportaista pisteytystä ISO14044 ja ISO14071 soveltaen (0=laatua ei ole arvioitu, 1=alhainen, 2 =keskitasoinen, 3=korkea). Pisteytyksen keskiarvon pohjalta muodostetaan mittariluokakohtainen luotettavuusindeksi. Tällöin saatuja tuloksia voidaan tarkentaa rakennushankkeen edistymisen aikana asetettujen tavoitteiden saavuttamiseksi.

Rakennushankkeen kannalta arviointi voidaan jakaa seuraavasti: suunnitteluvaihe, toteutusvaihe, valmistunut rakennus sekä rakennuksen käyttövaihe. Tämä vaikuttaa kuitenkin osaltaan vaadittavien tietojen laajuuteen sekä luotettavuusasteeseen. Alkuvaiheen elinkaariarvioinnissa tiedot voivat perustua suunnitteludokumentteihin ja tarkennetussa menetelmässä todennettuihin mm. määräluetteloihin.

EU Level(s) koostuu kuudesta päätavoitteesta, jotka voidaan jakaa eri ympäristövahinkokategorioihin, joita ovat asumisterveys, resurssi- ja materiaalihokkuus sekä ilmastonmuutos.

Level(s) -menetelmän mittariluokat (indikaattorit)

1. Elinkaaren hiilijalanjälki
2. Resurssitehokas materiaalien käyttö
3. Veden kulutus
4. Terveelliset tilat ja sisäilman laatu
5. Sopeutuminen ilmastonmuutokseen
6. Elinkaarikustannukset

Kaikkia päätavoitteita ei tarvitse arvioida kohteessa vaan arviointi voidaan toteuttaa käyttäen haluttuja indikaattoreita käyttäen. Arvioinnissa on käytettävissä kolme eri tarkkuustasoa, jotka ovat yksinkertaistettu ja vertaileva arviointi sekä yksityiskohtainen optimointi. Erona arviointien tarkkuustasoissa on se, miten vertailu toteutetaan: yksittäisen rakennuksen osalta itsenäisesti vai toiminnallisesti samanlaisten rakennusten vertailuna. Tällöin arviointi voidaan nähdä kuusiportaisena koostuen tavoitteiden asettamisesta aina laadun arviointiin.

1. Valitse halutut indikaattorit ja työkalut
2. Valitse haluttu taso suorituskyvyn arvioimiseksi
3. Määrittele rakennus jonka haluat raportoida
4. Noudata ohjeita ja sääntöjä
5. Noudata raportointiohjeistusta
6. Määritä arvioinnin vaikuttavuus ja arvioinnin luotettavuus

## 2.2.2 Ympäristöministeriön arviointimenetelmä

Ympäristöministeriön (YM) -arviointimenetelmä perustuu Euroopan komission laatiman Level(s)-menetelmään (katso: 3.4.2. EU Level(s)). Sen pohjana ovat eurooppalaiset kestävä rakentamista koskevat standardit (mm. EN 15643-sarja, EN 15978 ja EN 15804) sekä aiheeseen liittyvä tieteellinen tutkimus. (Ympäristöministeriö 2019)

Menetelmän avulla vähähiilisuuden arviointi voidaan tehdä kaikille rakennuksille ja sitä voidaan soveltaa sekä uudis- että korjausrakentamisen hankkeisiin. Arviointi on tarkoitettu tehtäväksi rinnan rakennuksen energiatehokkuuden arvioinnin kanssa rakennussuunnitteluvaiheessa. Tässä vaiheessa on käytettävissä tarpeeksi yksityiskohtaisia tietoja rakennuksen materiaaleista ja energiantarpeesta. (Ympäristöministeriö 2019)

Arviointi tehdään rakennuksen koko elinkaaren ajalle. Elinkaareen sisältyvät rakennustuotteiden valmistus, kuljetukset ja työmaatoiminnot, käyttö ja korjaukset sekä purku ja kierrätys. Arviointimenetelmässä huomioidaan koko rakennus, tontin rakenteet sekä keskeinen osa taloteknisistä järjestelmistä. Arviointiin ei sisällytetä tontilla olevaa maaperää, kasvillisuutta, tai rakentamisessa tarvittavia telineitä ja suojauksia. (Ympäristöministeriö 2019)

YM-arviointimenetelmän merkittävimpanä erona Level(s) -menetelmään voidaan nähdä se, ettei vedenkulutusta arvioida kohdekohtaisesti vaan pääpainoa annetaan hiilijalan-  
jäljen kannalta rakentamisen tuotteiden sekä rakennuksen käytön aikaisille vaikutuksille.

# 2.3 Rakentamisen elinkaariarviointi

## 2.3.1 Elinkaariarvioinnin vaiheet

Elinkaariarviointi käsittelee rakennusten osalta ympäristönäkökohtia ja rakennuksen aiheuttamia ympäristövaikutuksia koko sen elinkaaren ajan. Tällöin voidaan puhua rakennuksen osalta "kehdestä hautaan" tarkastelusta, jossa otetaan huomioon tuotteiden valmistus, käyttö, käytöstä poisto, kierrätys ja aiheutuvat jätteet. Elinkaariarviointiselvityksessä on neljä vaihetta ISO 14044 mukaisesti:

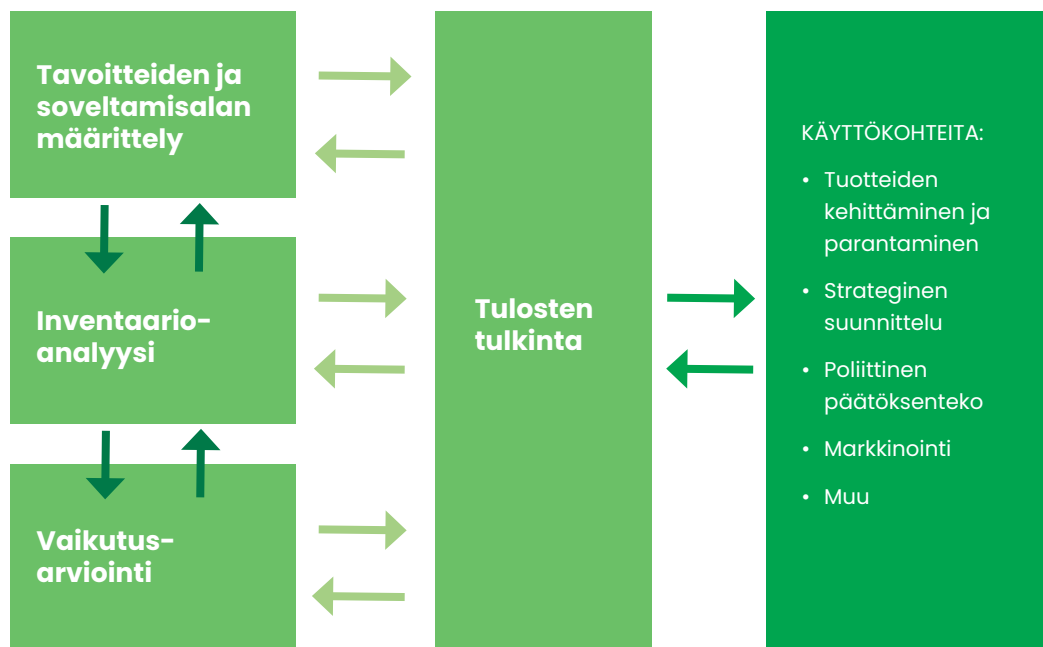
- a. Tavoitteiden ja soveltamisalan määrittelyvaihe
- b. Inventaarioanalyysivaihe (LCI)



- c. Vaikutusarviointivaihe (LCIA)
- d. Tulkintavaihe

Tavoitteiden määrittäminen on ensisijaisen tärkeää, jotta arvioinnin laajuus voidaan rajata niin rajausehtojen osalta kuin tavoiteltavien päästöraja-arvojen osalta. Inventaarioanalyysivaiheessa selvitetään syöte- ja tuotostietojen inventaario, johon sisältyy tarvittavan tiedon kerääminen. Rakennusten osalta tämä voidaan nähdä luonnossuunnittelu- tai viimeistään urakkavaiheen dokumentteihin perustuvana. Inventaarioanalyysi on mahdollista tehdä toteutuneisiin tai toteutuksessa oleviin dokumentteihin perustuen. Vaikutusarviointivaiheessa tuotetaan lisätietoa tulosten arvioinnin avuksi, johon voi sisältyä osaltaan yksittäisten tunnistettujen rakennusosien optimointia. Tulkintavaiheessa käytetään hyödyksi inventaarioanalyysivaiheen, vaikutusarvioinnin tai niiden yhdistettyjä tuloksia. Tulkintavaiheen tavoitteena on luoda johtopäätöksiä sekä suosituksia päätöksenteon avuksi. Tämä asettaa vaatimuksia ja suosituksia läpinäkyvyydelle, jotta tulosten tulkinta olisi päätöksenteon kannalta tavoitteellista ja puolueetonta (Kuva 3.). (SFS-EN ISO 14040, 8-10)

## ELINKAARIARVIOINNIN PÄÄPIIRTEET



Kuva 3. Elinkaariarvioinnin vaiheet (SFS-EN ISO 14040, 24)

### 2.3.2 Arviointityökalut

Rakennusten elinkaaren päästöjen arviointi perustuu elinkaaren päästölaskentaan (LCA). Rakennusten elinkaaren päästöjen arviointiin on olemassa monia eri työkaluja, joista osa on saatavilla ilmaiseksi ja osa kaupallisesti. Arviointityökaluna voi käyttää esim. ympäristöministeriön tai Suomen Ympäristökeskus SYKE:n kehittämiä yksinkertaisia arviointitaulukkoja. Kehittyneempiä arviointityökaluja edustaa mm. Bionova Oy:n One Click LCA-ohjelmisto.

### 2.3.3 Arvioinnin tekijältä vaadittavat pätevydet

Elinkaariarvioinnin tekijälle ei ole asetettu erityisiä vaatimuksia mm. Ympäristöministeriön arviointimenetelmässä, mutta ISO/TS 14071:2014 standardina voidaan käyttää ohjaavana pätevyyden määrittämisen osalta. Tuotteiden osalta arvioijan vaatimuksia on määritelty seikkaperäisemmin mm. Product Environmental Footprint Guide (2012) -oppaassa. ISO 14071 standardissa on määritetty arvioinnin tarkastajan pätevyksien osalta seuraavaa.

Arvioijalla (tarkastajalla) tulee olla tietämystä ja osaamista: (ISO/TS 14071:2014, Annex E, 8)

- Asiaankuuluvaa tieteellistä tai teknistä asiantuntemusta
- Tietoinen LCA menetelmän vaatimuksista ISO 14040 ja ISO 14044 mukaisesti
- LCA menetelmäopista ja käytännöstä, erityisesti LCI osalta.
- Kriittisen arviointimenetelmän käyttökokemusta
- Tieteellisistä periaatteista (liittyen vaikutuskategorioihin)
- Arvioitavan järjestelmän tietämystä ympäristö/teknillisistä näkökulmista
- Kielitaitoa arvioida analyysia
- Katselmuksen suorittaja osoittaa tietämyksen ansioluettelon sekä referenssien avulla.

Ohjesääntönä voidaan pitää, että arvioinnin tulee johdattaa johdonmukaisuutta, läpinäkyvyyttä, luotettavuutta/ uskottavuutta ja tehokkuutta. Tehokkuus on nostettuna tähän sen takia, että arvioinnin tekijällä tulee olla riittävät resurssit arvioinnin toteuttamiseen. Resurssien riittämättömyys voi johtaa viivästyksiin mm. vaihtoehtoisten hiilijalanjälkeä pienentävien tekijöiden esittämisessä, jolloin niiden vaikuttavuus vähenee sekä vaikuttaa pahimmassa tapauksessa kilpailutuksessa asetettuihin päästötavojen saavuttamiseen.

Arvioinnin tekijän tuleekin arvioida elinkaariarvioinnin kaikissa vaiheissa:

- Oma osaamista sekä sidonnaisuuksia suhteessa toimeksiantajaan
- Standardien ja menetelmien yhteneväisyyttä (ISO- ja EN standardit)
- Tietojen luotettavuutta, ajantasaisuutta sekä tarkkuutta (LCI ja EPD:t)
- Lähtötietojen kattavuutta, päivittymistä sekä yhdenmukaisuutta ARK/RAK/TATE ym.
- Ovatko dokumentit riittävän tarkkoja? Onko niiden välillä ristiriitaisuuksia?
- Rajaussääntöjen käyttöä sekä niiden skaalaamista haluttuun tasoon nähden
- Erikoistilanteet ja kompromissit
- Raportointi ja tiedottaminen on läpinäkyvää ja se on annettu sidosryhmille/tilaajalle arvioitavaksi ennen lopullista painoversiota

Seuraavassa kuvatut havainnot ja suositukset perustuvat Karelia-ammattikorkeakoulun ja sen Kohti vähähiilistä rakentamista – Joensuu Wood City -projektissa saatuihin kokemuksiin järjestettyjen koulutusten, opinnäytetöiden ohjauksien ja tarjottujen opiskelijaharjoittelujen osalta. Saatujen kokemusten perusteella arvioijan vaatimusten voidaan nähdä toteutuvan rakennusten elinkaariarvioinnin osalta, jos arvioinnin tekijällä on arkkitehdin, talotekniikan tai rakennusalan koulutus täydennettynä elinkaariarvioinnin opinnoilla ja alan työkokemuksella. Elinkaariarvioinnin vaatimusten osalta soveltuvaksi voidaan nähdä myös energia- ja ympäristöpuolen koulutuksen saanut henkilö, joka on hankkinut rakennusalan tietämystä erillisillä opinnoilla, työkokemuksella tai toimimisessa rakennusten elinkaariarvioinnin tehtävissä. Alkuvaiheessa uraa suositellaan toimimista avustavana elinkaariarvioijana kokeneemman palvelua tuottavan organisaation tai työryhmän alaisuudessa. Tilaaja/rakennushankkeeseen ryhtyvä voi määrittää osaltaan arvioijalta

vaadittavat pätevyudet tai nimittää arviointityöryhmän sekä sen pätevyudet ja osaamisvaatimukset. Arvioijalta ei ehdoteta kuitenkaan vaadittavaksi erillistä pätevyyttä tai akkreditointia tehtävässä toimimiseen.

Saatujen kokemusten perusteella rakennus- ja talotekniikan koulutus nyky muodossaan ei vielä takaa riittäviä edellytyksiä laskennalle vaan vaatii perehdytyksen käytettäviin standardeihin etenkin laskennan rajaussääntöjen osalta (cut-off rules). Hämmennystä aiheutti etenkin ympäristöselosteet (EPD) sekä kriittinen arviointi. Tällöin suositeltavaksi perehdytyksen sisällöksi suositellaan elinkaariarvioinnin standardien ja elinkaariarviointimenetelmien sisällyttämistä. Rakennus- ja talotekniikan koulutustaustan omaavien henkilöiden osaaminen määrälaskentaan on riittävää. Energialaskennan sekä simuloinnin lisääntyminen koulutustarjonnassa on myös johtanut energiaselvitystulosten tulkinnan parantumiseen.

Energia- ja ympäristötekniikan osalta tilanne voidaan nähdä toisena. Saatujen kokemusten perusteella energia- ja ympäristötekniikan opiskelijoiden osalta haasteena on rakennusasiakirjojen ja rakennekuvien tulkinta sekä määrätietojen ja hukan arviointi. Suurimpana haasteena etenkin on raudoitusten tulkinta mm. jatkospiituuksien sekä raudoitusverkkojen limitysten osalta. Lisäksi osaamista tarvittaisiin lisää energiaselvitysten tulkintaan, jossa painotettava ostoenergian ja energiamuotokertoimella painotetun energiankäytön eroja. Elinkaariarvioinnin rajaussääntöjen sekä ohjeistusten tietämys oli hyvää aikaisemman koulutustaustan johdosta, jolloin arviointimenetelmien käyttö sekä tulkinnat olivat linjassa tarkastuksen kanssa. Tällöin suositeltavaksi perehdytyksen sisällöksi suositellaan määrälaskennan, rakennusosanimikkeistön sekä rakennus- ja rakennusasiakirjojen tulkinnan sisällyttämistä.

Käyttökoulutus näiden kaikkien edellä mainittujen koulutus- ja ammattialojen suhteen elinkaariarviointiohjelmistojen osalta esim. OneClick LCA on toissijaista näihin edellä mainittuihin tekijöihin verrattuna, koska virheen mahdollisuus ohjelman määrätietojen syötön osalta voidaan eliminoida jo määrälaskentavaiheessa. Suosituksena ehdotetaan käytettäväksi vertailujen kesken materiaali- tai tuotetietoja vastaavia ympäristöselostetietoja tai yhtenäisiä tarkastettuja ympäristöselostelista esim. suunnittelutoimistoissa.

### 2.3.4 Päästötiedot

Eri materiaalien päästöihin vaikuttaa merkittävästi se käytetäänkö laskennassa yleisiä päästötietoja vai kolmannen osapuolen tarkastamia tuotekohtaisia ympäristöselosteita (EPD). Tällöin päästötiedot voidaan jakaa eri tasoihin niiden tarkkuuden sekä laadintape-riaatteen mukaan (Bionova 2017):

- Tuote: valmistajan tietyn tuotteen CO<sub>2</sub>-päästöt
- Tuoteryhmä: valmistajana tietyn tuoteryhmän CO<sub>2</sub>-päästöt
- Teollisuudenalan keskiarvo: koko alan tai tietyn valmistajajoukon tuoteryhmän tai tuotteiden CO<sub>2</sub>-päästöjä joko kansallisesti tai kansainvälisesti
- Yleiset tiedot, joka kuvaavat ylimmän tason tuoteryhmää

Rakennuskohteiden päästötietojen arvioimiseksi luotettavalla tasolla, on arvioijalla osaltaan vastuu valita rakennusmateriaali kohtaiset päästötiedot, jotka vastaavat mahdollisimmat hyvin suunnitelmissa mainittuja materiaaleja tai rakennushankkeen toteutus- ta vastaavia käytettyjä materiaaleja.

Tätä tarkoitusta varten on saatavilla materiaali ja rakennusosakohtaisia ympäristöselosteita ja kansallisia sekä kansainvälisiä tietokantoja, kuten RTS EPD, jota ylläpitää Rakennustietosäätiö. Suomessa käytettävää rakennustuotteiden ja -prosessien päästötie-

tokantaa kehitetään parhaillaan. Ennen tietokannan valmistumista voidaan myös käyttää rakennuksen vähähiilisyysarviointiin eri arviointityökaluihin sisältyviä päästötietoja. (Ympäristöministeriö 2019). Aihealuetta tarkastellaan tarkemmin tämän julkaisun kohdassa: 4.5 Tuotteiden päästöarvot ja niiden valinta).

### 2.3.5 Tietomallinnus päästölaskennan mahdollistajana

Rakennusten elinkaaren päästölaskentaa varten tarvitaan eri rakennusmateriaalien ja -osien määrätiedot. Laskettavan kohteen tietomallia voidaan pitää lähes välttämättömänä laskennan kustannustehokkaan toteuttamisen kannalta. Tietomallinnuksessa tulisi kuitenkin huomioida elinkaaren päästölaskennan vaatimukset jo sen alkumetreillä.

Vaativalla elinkaarikustannuksien laskentaa hankkeelle tulee asetettua myös vaatimuksia parantuneelle dokumentoinnille mm. tietomallien käyttö. Tällä voidaan estää työmaa-aikaisten lisätöiden aiheuttamia kustannuksia sekä lyhentää rakentamisaikaa. Tämä vaatii kuitenkin sitä, että tavoitteet mallinnuksen tarkkuustasolle asetetaan riittävän korkeaksi (YTV2012, vähintään tarkkuustaso 2). Jotta laskentamallit olisivat hyödynnettävissä suunnittelun ohjauksessa sekä elinkaariarvioinnissa. Urakka/päästölaskennassa on noudatettava yhteisiä tietomallivaatimuksia hankkeen kaikkien osapuolten kesken sekä laatia tietomalliohje kohteelle.

Seuraavassa on kuvattu Karelia-ammattikorkeakoulun Kohti vähähiilistä rakentamista – Joensuu Wood City -projektissa saatuja kokemuksia tietomallien käytöstä elinkaaren päästölaskennan tukena. Mikäli elinkaariarvioinnin määrätiedot perustuvat ARK-tietomalliin on vaarana, että rakennusosakohtaiset määrät eivät vastaa todellisuutta. Tämä on mahdollista etenkin betonirakenteilla, joissa sisäkuoren korkeus ei vastaa ulkokuoren korkeutta johtuen suurempiin määrätietoihin betonimäärien osalta rakennusosakohtaisessa luokituksessa. Myöskään betonielementtien raudoitus tai varustelutietoja ei tällöin ole saatavilla.

RAK-tietomallia (YTV2012, tarkkuustaso 3) hyödynnettäessä määrätiedot saadaan kerättyä tuoteosatasolla raudoituksiin. Ongelmaksi saattaa kuitenkin muodostua puutteet rakennusosaluokituksissa sekä luokitusvirheet. Saatujen kokemusten perusteella onkin suositeltavaa, että tilaaja tai rakennushankkeeseen ryhtyvät vaatisivat tarkempaa tietomallien tarkkuustasoa: vähintään YTV2012 tarkkuustaso 2. Tämä pienentää osaltaan myös elinkaariarvioinnin suorittamiseen käytettävää aikaa ja kustannuksia.

### 2.3.6 Päästöjen vertailu

Eri kohteiden päästöjen vertailussa on huomioitava, että eri päästötiedoilla, arviointimenetelmillä tai laskentatyökaluilla tehdyt arvioinnit eivät välttämättä ole suoraan keskenään vertailukelpoisia. Esimerkiksi Level(s) arviointimenetelmässä rakennuksen elinkaaren päästöjen tarkastelujakso on 60 vuotta kun taas Ympäristöministeriön menetelmässä 50 tai 100 vuotta.

Useimmiten suurimmat erot rakennusten elinkaaren päästöjen vertailussa aiheuttaa eri energiamuotojen päästökertoimet ja arvot. Esimerkiksi kaukolämmön osalta on saatavilla paikkakuntakohtaisia päästöarvoja, jotka voivat poiketa merkittävästi Ympäristöministeriön määrittelemästä koko Suomen keskiarvosta (katso: 3. Rakennusurakkeiden vertailu päästöjen näkökulmasta). Seuraavassa esitellään muutamia olemassa olevia työkaluja, joiden avulla rakennuksen elinkaaren päästöjä voidaan verrata muihin käyttötarkoitukseltaan vastaaviin rakennuksiin.

### 2.3.6.1 Carbon Heroes Benchmark Program

Bionova Oy:n One Click LCA-ohjelmiston mukana tulevan Carbon Heroes Benchmark -ohjelmiston (<https://www.oneclicklca.com/construction/carbonheroes/>) avulla voi vertailla kohteen päästötietoja yli 1000 tietokantaan syötetyn rakennuksen avulla. Ohjelmisto mahdollistaa myös maantieteelliset rajaukset vertailun tekemiseksi, jolloin tulokset voi rajata esim. Pohjoismaihin.

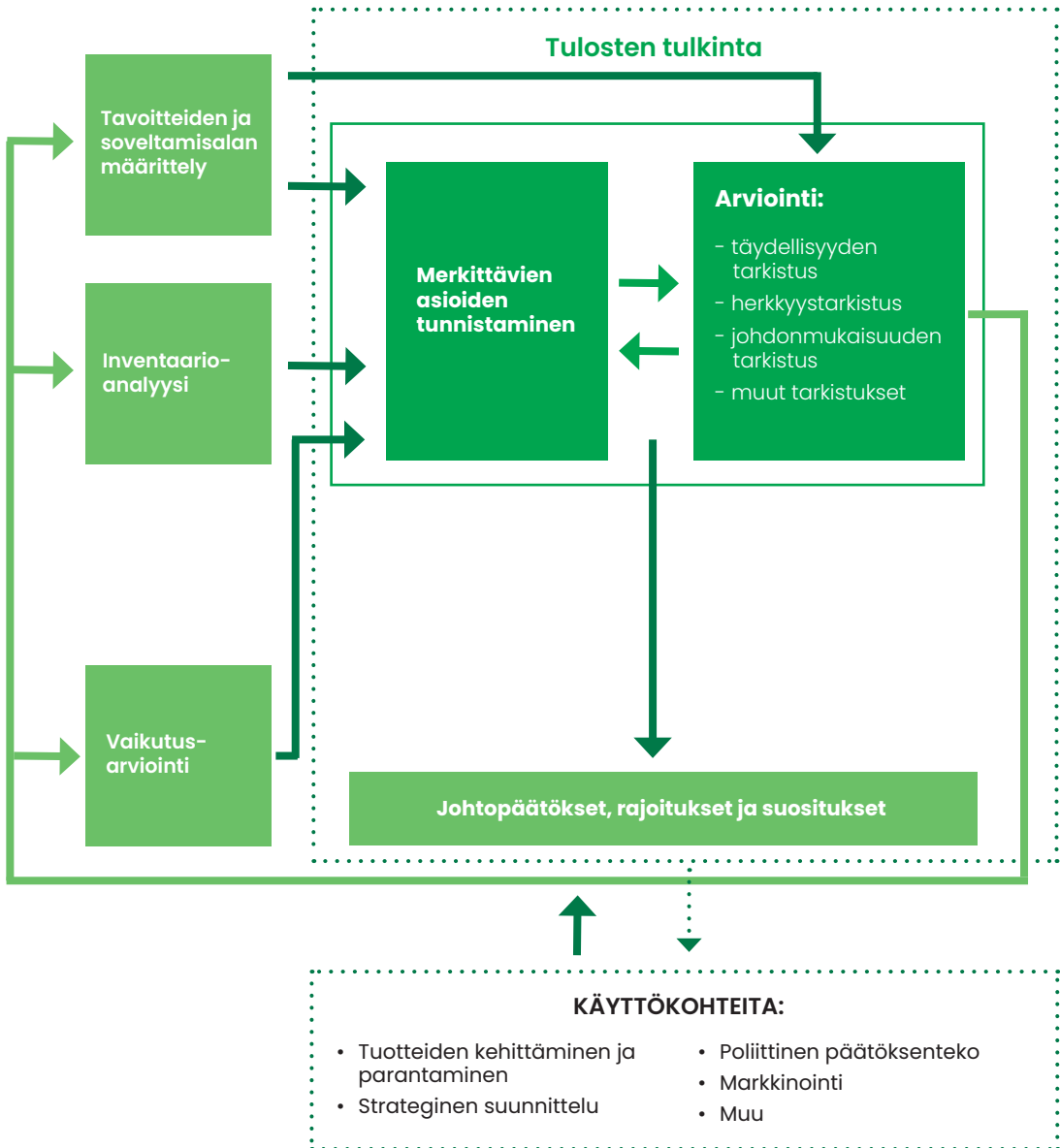
### 2.3.6.2 Talo-hankkeen tulokset

Suomen ympäristökeskus SYKE:n toteuttamassa TALO-hankkeessa tutkittiin taloudellisten ohjaukeinojen toimivuutta vähähiilisen rakentamisen ohjauksessa. Hankkeessa arviointiin myös tulevan määräystason raja-arvoa uudisrakentamiselle elinkaaren hiilidioksidipäästöjen osalta. TALO-hankkeen loppuraportissa esitetään, että ensi vaiheessa määräystason raja-arvo voisi olla 15 kg CO<sub>2</sub> e/m<sup>2</sup> vuosi 50 vuoden tarkastelujaksolla. Loppuraportin mukaan tämä raja-arvo on realistinen ja se on mahdollista saavuttaa rakenteellisten ratkaisujen ja/tai maalämmön hyödyntämisen avulla. (Kangas ym. 2019). Alustavasti tätä tietoa voi käyttää vertailussa, mutta on hyvä myös huomioida, että tavoite on nykytilaan nähden melko kunnianhimoinen.

## 2.3.7 Hiilijalanjälkiarvioinnin tulokseen vaikuttavat epävarmuustekijät ja luotettavuuden arviointi

Tietojen kelpoisuus ja luotettavuus ovat avaintekijöitä elinkaariarvioinnin osalta. Pohjana periaatteiden osalta voidaan pitää standardia SFS-EN ISO 14040 elinkaariarvioinnin suorittamisen osalta. Tarkentavia ohjeita sekä suuntaviivoja arviointia varten antaa sen sijaan SFS-EN ISO 14071 ja lopuksi kriittistä arviointiprosessia ja tarkastelua selventää standardi SFS-EN ISO 14044. Kyseiset standardit on ilmoitettu lukijalle tällöin tiedoksi tarkempien ohjeiden saamiseksi. Seuraavassa on kuvattu kyseisistä standardeista tehtyjä huomioita Karelia-ammattikorkeakoulun Kohti vähähiilistä rakentamista – Joensuu Wood City -projektin osalta.

## ELINKAARIARVIOINNIN PÄÄPIIRTEET



Kuva 4. Elinkaariarvioinnin arviointiprosessin pääpiirteet (SFS-EN ISO 14044, 32)

Rakennuksen elinkaaren päästöjä arvioitaessa rakennushankkeiden eri vaiheissa, voidaan tunnistaa uusia tietovaatimuksia ja rajoituksia, jotka vaativat arviointitietojen keruun menettelytapojen muuttamista (Kuva 4.) (SFS-EN ISO 14040, 34). Tällaisina muutoksina voidaan nähdä osaltaan muuttuneet vaatimukset elinkaariarvioinnin tarkkuustasolle esimerkiksi siirryttäessä luonnossuunnitteluvaiheesta tarjousten arviointiin urakkasuunnitteluvaiheessa. Keskimääräisten tuoteosakohtaisten määrien käyttö vertailussa ei ole enää tällöin perusteltua, vaan arvioinnin tulisi perustua laadittuihin urakkalaskenta-asiakirjoihin. Kyseinen tekijä tulee huomioida etenkin arvioitaessa esitettyjen tarjousten neliökohtaista hiilijalanjälkeä, kuin myös asetettaessa kannustimia hiilijalanjäljen pienentämiseksi suunnittelun edetessä. Tällöin korostuukin elinkaariarvioijan kyky tulkita hänelle luovutettuja tietoja niiden oikeellisuutta sekä niitä vastaavien ympäristöselosteiden valinta. Ympäristöselosteet tulisi valita niin, että ne vastaavat riittävällä tasolla asiakirjoissa ilmoitetun tuotteen ominaisuuksia sekä tyyppiä. Tietojen luotettavuutta voidaan arvioida EU Level(s) sekä Ympäristöministeriön arviointimenetelmää mukailien käyttäen tietojen luotettavuustasoina.

- Arvioinnin tekijän osaamista sekä kokemusta
- Käytettyjä menetelmiä ja niiden soveltuvuutta
- Teknistä edustavuutta
- Maantieteellistä edustavuutta
- Ajallista luotettavuutta
- Epävarmuustekijöiden huomiointia

Tällöin on tärkeää osaltaan toteuttaa tietojen varmistaminen SFS-EN ISO 14044 mukailien. Tietojen kelpoisuus sekä niiden ajantasaisuus tulee varmistaa koko tiedonkeruuprosessin aikana. Menetelmien tulee ovat tieteellisesti sekä teknisesti päteviä (menetelmät yhteneviä standardien kanssa ja tunnustettuja) Käytettävän datan (määrätiedot) on oltava asiaankuuluvaa ja järkevää suhteessa tarkastelun tavoitteisiin (tietojen luotettavuus sekä lähtötietojen määrä/laatu).

Laadunvarmistusmenettelyn vaatimukset vaihtelevat menetelmäkohtaisesti. Ympäristöministeriön yksinkertaistetussa arviointimenetelmässä tulokset katsotaan luotettavaksi, kun rakennusmateriaalit on raportoitu menetelmäohjeen mukaisesti. Luotettavuus saavutetaan rakennusmateriaalien osalta käyttämällä arviointimenetelmän taulukkoarvoja ja kansallista päästötietokantaa. Tarkennetussa menetelmässä käytettäessä tuote- ja materiaaliikohtaisia tietoja tulee laskentatulosten laatu arvioida ja raportoida menetelmäohjeen mukaan. Laadunvarmistusmenettely on näiltä osin yhtenevä EU Level(s) menetelmän kanssa.

Laadunvarmistus voi sisältää esimerkiksi ympäristöselosteiden (EPD) vertailuanalyyysien laatimista rakennusosatasolla. Esimerkkinä tilanne, jossa rakennetyypeissä ei ole ilmoitettu tuotenimikettä tai teknisiä ominaisuuksia tuotteelle. Mainintana käytetty yleisesti eristemateriaalin osalta "mineraalivilla", joka voi tarkoittaa niin lasi- kuin kivivillaa. Tällöin arvioinnin tekijän tulee varmistaa tieto, joko kohteen muista asiakirjoista, kysymällä rakennesuunnittelijalta tai urakoitsijalta käytettävä toteutustapa tai jos tietoja ei kyselyistä huolimatta saada vertailuanalyyysina. Vertailuanalyyysin vaiheita käsitellään tarkemmin kohdassa "4.9 Rakenteiden hiilijalanjäljenvertailu teknisten ominaisuuksien perusteella".

# 3 Rakenneratkaisujen vertailu päästöjen näkökulmasta

Tässä osiossa käydään läpi tyypillisiä rakeneratkaisuja elinkaaren päästöjen osalta kirjallisuuden ja Kohti vähähiilistä rakentamista – Joensuu Wood City -projektin aikana laskettujen kohteiden sekä suunnitellun tyyppitalon avulla. Tyyppikerrostalon rakeneratkaisuista on myös ladattavissa tietomallit sekä rakennetyypit, jotka havainnollistavat suunnitteluratkaisuja (<https://karelia.fi/puurakentaminen/tutkimus/>). Nämä ladattavat mallit on tehty elinkaarilaskennan tueksi, eivätkä niiden tekijät vastaa niissä mahdollisesti esiintyvistä virheistä.

## 3.1 Esimerkkikohteiden vertailu

**K**ohti vähähiilistä rakentamista – Joensuu Wood City -projektin yhtenä keskeisenä toimenpiteenä toteutettiin elinkaaren päästölaskentaa konkreettisille rakentamisen kohteille (Kuva 5.). Elinkaariarviointin tavoitteena oli ensinnäkin syventää projektin toteuttajien omaa ja sen sidosryhmien ymmärrystä elinkaaren päästölaskentaan liittyen sekä toisaalta hyödyntää laskennan tuloksia näiden kohteiden keskinäisessä vertailussa. Laskennan kohteeksi valikoitui yhteensä kuusi eri kohdetta, joista viisi edusti opetus- ja kokoontumistiloja ja yksi asuinkiinteistöä. Näistä kolme edusti massiivipuu- ja kolme betonirunkoisia rakennuksia.





Kontioniemen koulu, Kontiolahti



Kuhmonkadun kampus, Lieksa



Nepenmäen koulu, Joensuu



Pikku-Kaarle päiväkotii, Nurmes



Sivistyskeskus Majju, Tohmajärvi



Asunkeuhrostalo, Koy Nurmeksken Vuokratatol

Kuva 5. Elinkaariaarviointiin kohteena toimineet rakennukset

Esimerkkikohteista Nepenmäen koulun määrälaskennan sekä hiilijalanjäljenarvioinnin toteuttamiseen osallistui myös viisi insinööriharjoittelijaa osana ympäristötekniikan työelämäharjoittelua. Kyseisestä työelämäharjoittelusta saatuja kokemuksia on hyödynnetty myös kohdan "2.3.3 Arvioinnin tekijältä vaadittavat pätevyudet" huomioissa. Nepenmäen koulusta saadut tulokset tarkastettiin osana projektin toimenpiteitä mukailien ISO- ja EN-standardeja.

### 3.1.1 Hankkeessa arvioitujen kohteiden tiedot

	Kontioniemen koulu, Kontiolahti	Kuhmonkadun kampus, Lieksa	Sivistyskeskus Maiju, Tohmajärvi	Nepenmäen koulu, Joensuu	Pikku-Kaarle päiväkot, Nurmes	Koy Nurmeksen vuokratilat, Nurmes
Hankkeen tyyppi	Uudisrakennus	Uudisrakennus	Uudisrakennus	Uudisrakennus	Uudisrakennus	Uudisrakennus
Rakennustyyppi	Opetus- rakennukset ja päiväkodit	Opetus- rakennukset ja päiväkodit	Opetus- rakennukset ja päiväkodit	Opetus- rakennukset ja päiväkodit	Opetus- rakennukset ja päiväkodit	Asuinrakennus, kerrostalo
Rakennusvuosi	2018	2020	2019	2018	2020	2020
Rakennuksen suunniteltu käyttöikä	100	100	100	50	100	50
Pinta-ala (br- m <sup>2</sup> )	1669	2854	5362	11663	1123,5	1107
Kerros- lukumäärä	2	2	2	3	1	3
Päärakennus- materiaali	Betoni	Puu (CLT)	Betoni	Betoni	Puu (Hirsi)	Puu (CLT)
Energia- tehokkuus- luokka kWhE/ (m <sup>2</sup> vuosi)	B (91)	B (93)	A (66)	B (96)	-	-
Ostoenergia, sähkö (kWh/vuosi)	95480	110821	170249	493891	-	-
Ostoenergia, kaukolämpö (kWh/vuosi)	223592	259771	294196	401924	-	-
Todellinen ostoenergia (kWh/vuosi)	319072	370592	464445	430500	-	-

Kuva 6. Projektissa arvioitujen rakennusten kohdetiedot

Rakennukset ovat valmistuneet vuoden 2018 jälkeen, jolloin suunnittelu on alkanut osassa vuoden 2016 tienoilla (Kuva 6.). Tämä tarkoittaa rakennustyyppejä tarkasteltaessa, että rakenteiden lämmönlämpöisyydetoimien (U-arvot) ovat kaikilla rakenteilla suositustasoa "Suomen rakentamismääräyskokoelman C3 (2010)" tai uudempien kohteiden osalta "1010/2017 Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen energiatehokkuudesta" mukaisia. Huomattavaa kuitenkin, että U-arvojen osalta ei ole kyseisten määräyksien ja asetusten välillä tapahtunut muutoksia. Tällöin vertailua voidaan toteuttaa tasavertaisemmin rakennusten energiankulutuksen sekä kokonaishiilijalanjäljen osalta. Rakennustyyppien osalta kohteissa onkin käytetty juuri vähimmäissuositustasoa rakennusosien lämmönlämpöisyydetoimien osalta.

Energiatodistustietojen perusteella vertailukohteet ovat lähes yhteneviä, ollen energiatehokkuusluokkaa B, pois lukien Sivistyskeskus Maiju (A-luokka). Kyseinen tekijä ei kuitenkaan suoraan vaikuta EU Level(s) tai Ympäristöministeriön arviointimenetelmää käytettäessä, koska käytetään ilman energiamuotokertoimella painotettua laskettua ostoenergian arvoa vuosittaiselle käytölle B6-vaiheessa. Jos haluttaisiin vertailla energiatehokkuutta ympäristönäkökulmista, olisi kyseisen tunnusluvun käyttö perustellumpaa. Tässä selvitystyössä on käytetty kaukolämmölle sekä sähköntuotannolle EU Level(s) menetelmässä

(Beta version 1.0) sijaintipaikkakunnan päästötietoja, jos ne vain ovat olleet saatavilla OneClick LCA ohjelmassa. Ympäristöministeriön arviointimenetelmässä sen sijaan käytetään keskimääräisiä päästötietoja arviointimenetelmän ohjeen mukaisesti.

### 3.1.2 Arvioinnin suorittamisen periaatteet ja rajaukset

Hiilijalanjäljenlaskentatyökaluna on käytetty kummallekin arviointimenetelmälle OneClick LCA-ohjelmistoa sekä sen kautta löytyviä tietokantoja tuotteiden ja materiaalien ympäristöselosteiden (EPD) osalta. Osalle kohteista toteutettiin vertailulaskenta materiaalien- ja tuotteiden hiilijalanjäljelle käyttäen OneClick LCA:ta ja tämän jälkeen syöttämällä tulokset YM -arviointimenetelmän excel-työkaluun. Arviointimenetelmien rajaussäännöt on huomioitu koostettaessa kohteiden rakennusosakohtaisia tietoja (BoQ-Bill of Quantities) sekä materiaalimääräluetteloita (BoM- Bill of Materials).

Työn tavoitteena oli myös saada näkyviin selkeämmin kahden eri menetelmän (EU Level(s) Beta version 1.0 vs. YM) tuomia eroavaisuuksia rakennusten kokonaishiilijalanjälkeen sekä se missä rakennuksen elinkaaren vaiheissa erot syntyvät merkittävimmin. Arviointiajanjaksona on käytetty EU Level(s) osalta 60 vuotta ja Ympäristöministeriön arviointimenetelmälle 50 vuotta. Vaihtoehtoisesti YM:n arviointimenetelmässä olisi voitu käyttää myös kohteiden osalta yleisesti ilmoitettua 100 vuoden suunniteltua käyttöikää, mutta tätä ei tehty vertailun helpottamiseksi.

Arviointiajanjaksot on mahdollista myös karkeasti yhdenmukaistaa käyttäen ajanjaksojen suhdelukua, jolla voidaan muuttaa hiilijalanjälkeä eri vaiheiden osalta. Tällöin on kuitenkin ymmärrettävä, että kasvatettaessa arviointiajanjaksoa lisääntyvät materiaalien ja tuotteiden vaihdosta- sekä korjauksesta aiheutuvat käytönaikaiset päästöt. Tämä tulisi parhaiten huomioiduksi uusimalla laskenta asettamalla uusi arvioitu käyttöikä käytettävään ohjelmaan. Karkeaan arviointiin ajanjaksojen suhdeluku on kuitenkin riittävän suuntaa antava tarkasteltaessa vuotuisia tai neliökohtaisia hiilijalanjäljen arvoja.

Kohteet edustavat pääasiassa opetusrakennuksia ja päiväkoteja. Ainoan poikkeuksen tekee Koy Nurmeksen vuokratalot ollen pääkäyttötarkoitukseltaan asuinrakennus. Kyseinen kohde toimiikin hyvänä tietona hiilijalanjäljen osalta, mutta käyttötarkoituksen poikkeamisen vuoksi sitä ei tulla käyttämään tunnuslukujen tai vertailun pohjana muihin kohteisiin. Tällöin pääpaino keskittyy samaa rakennustyyppiä edustavien rakennusten vertailuun.

Rakennuskohteiden perustiedoissa on huomioitavaa myös se, että osassa kohteita (Pikku-Kaarle päiväkotia, Nurmeksen vuokratalot) ei ole saatu energiatodistustietoja, joten laskenta on toteutettu ilman. Tämä alentaa rakennuskohteen kokonaishiilijalanjälkeä ja kyseisiä kohteita ei tulekaan käyttää kokonaishiilijalanjäljen osalta vertailuun. A1-3 tuotteiden sekä työmaatoimintojen sekä kuljetusten osalta (A4 ja A5) osalta kohteet ovat soveltuvia vertailuun.

### 3.1.3 EU Level(s) arviointimenetelmän

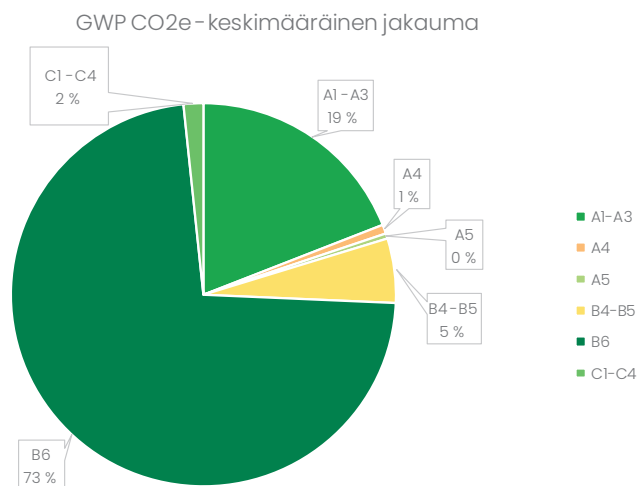
	Kontioniemen koulu, Kontiolahti	Kuhmonkadun kampus, Lieksa	Sivistyskeskus Majju, Tohmajärvi	Nepenmäen koulu, Joensuu	Pikku-Kaarle päiväkotii, Nurmes	Koy Nurmeksen vuokratilat, Nurmes
GWP, yhteensä kg CO <sub>2</sub> e	6026443	4 521582	11690362	10591983	458072	230752
(kg CO <sub>2</sub> e / m <sup>2</sup> ) / a	34,41	24,38	39,31	15,14	6,80	3,47
kg CO <sub>2</sub> e / m <sup>2</sup>	2064,56	1463,06	4956	908,17	407,72	208,45
Huomiot					Ei sisällä energiankulutustietoja	Ei sisällä energiankulutustietoja

Kuva 7. Keskimääräisiä GWP-arvoja 60 vuoden tarkastelujaksolla hyödyntäen EU Level(s) arviointimenetelmää

Tarkasteltaessa kohteita tehdään vertailu kokonaishiilijalanjäljen osalta niiden kohteiden välillä, joista on saatavilla tiedot koko rakennuksen elinkaaren ajalta (mukaan lukien energiankulutustiedot ostoenergian osalta). Kohde, jossa kaikkia tietoja ei ole saatavilla voi tällöin toimia vertailuna vain siinä olevien rakennusten elinkaarenvaiheiden osalta.

Tarkasteltaessa kohteita EU Level(s) arviointimenetelmän mukaisesti voidaan huomata, että Nepenmäen koulu on vertailtavista kohteista vähähiilisin kokonaisuuden kannalta. Tätä selittää osaltaan käytetyn kaukolämmön paikalliset päästöarvot (Kuva 7.), rakennuksen muoto ja massoitelu, kerrosluku, vaipan aukotus, sisäänvedot, jotka alentavat osaltaan kokonaishiilijalanjälkeä.

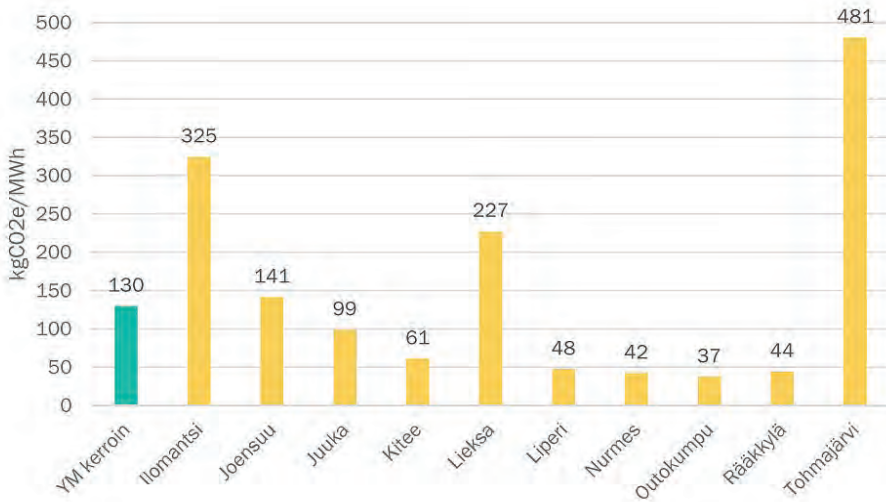
Tehdyssä vertailussa suurimpana kokonaishiilijalanjäljen aiheuttajana on käytön aikainen energiankulutus (B6), joka on tarkasteltavien kohteiden osalta keskimäärin noin 73 % rakennuksen elinkaaren aikaisista päästöistä (Kuva 8.). Tuotevaiheen (A1-3) päästöt ovat noin 19 %, kuljetusten (A4) 1 %, huoltojen (B4-5) 5 %. sekä elinkaaren lopun (C1-C) 2 %. Työmaatoimintojen (A5) keskimääräiset päästöt ovat tehdyn vertailun mukaan vähämerkityksellisimmät.



Kuva 8. Päästöjen keskimääräinen jakauma.

Käytetyn kaukolämmön paikalliset päästöarvot vaikuttavat myös suuresti saataviin kokonaistuloksiin (Kuva 9.), jolloin materiaalien osuus päästöistä on nykyisellään pienemmällä painoarvolla. Jos kaukolämmön päästöjä saadaan sen sijaan pienennettyä tulevat materiaali-kohtaisten päästöjen saamaan suuremman merkityksen päästöjen näkökulmasta. Tämä kehityssuunta on odotettava ja nähtävissä Ympäristöministeriön sekä uusimman EU Level(s) arviointimenetelmän (publication version 1.0) olevina päästöjen vaikutuskerroimien pienentämisenä.

Nepenmäen koulu sijaitsee Joensuussa, jossa "Fortum Power and Heat Oy, Joensuu" arvoksi on annettu OneClick LCA:n ympäristölähteen mukaisesti 0,15 kg CO<sub>2</sub>e/kWh. Suurimman rakennuksen elinkaaren aikaisen hiilijalanjäljen saaneella Sivistyskeskus Maijulla samainen päästöarvo on "Vapo Oy, Tohmajärvi" 0,46 kg CO<sub>2</sub>e/kWh ollen näin yli kolminkertainen Nepenmäkeen verrattuna. Tämän takia ei kohteita vertailtaessa riitä pelkästään kokonaismäärien toteaminen hiilijalanjäljen osalta vaan tarve tarkastella vaikuttavia yksittäisiä rakennuksen elinkaaren vaiheita korostuu entisestään. Huomioitavaa tässä vertailussa on myös se, että Kontiolahden kohteelle ei ollut saatavilla paikallisia kaukolämmön päästöarvoja, jolloin on jouduttu käyttämään keskimääräisiä päästöarvoja, jotka voivat vääristää tuloksia.



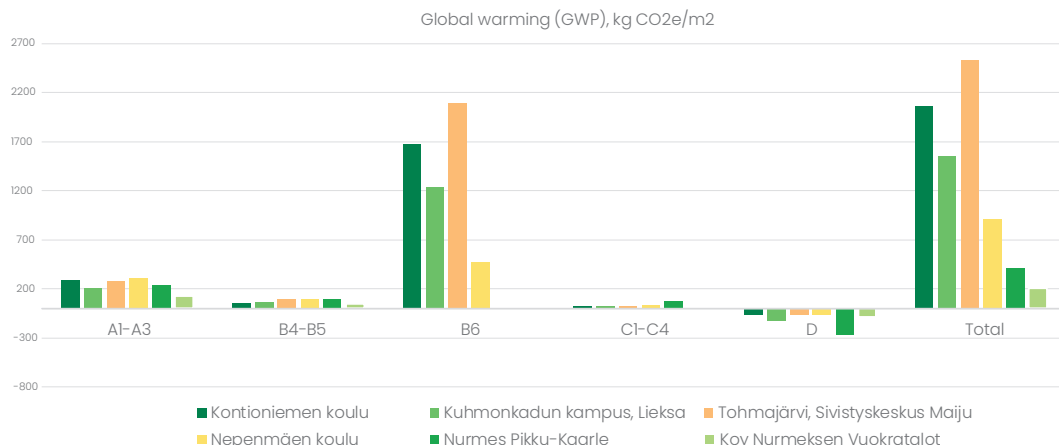
Kuva 9. Kaukolämmön alueelliset GWP päästöt kgCO<sub>2</sub>e/kwh keskiarvona vuosilta 2013–2017 (Huuhtanen ym. 2020).

Seuraavassa tarkastellaan yksittäisiä osuuksia (kgCO<sub>2</sub>e/ m<sup>2</sup>) rakennuksen elinkaaren osalta bruttoneliötä kohden (Kuva 10.). A1–3 vaiheen osalta puurakenteinen Kuhmonkadun kampus on vähäpäästöisin, kun taas Nepenmäen koulu suuripäästöisin. Rakennusosittain tarkasteltaessa suurimmat päästöt muodostuvat rakennuksen elinkaaren aikana kaikissa arvioiduissa kohteissa rungon, julkisivujen sekä perustuksien materiaaleista.

Rungon päästöjen osuus on pienin puurakenteisessa Kuhmonkadun kampuksessa, johon kohteessa käytettyjen materiaalien pienemmästä hiilijalanjäljestä. Kontiolahden sekä Tohmajärven kohteissa rakennuksen rungon päästöihin vaikutti myös merkittävästi aukotusten osuus julkisivun pinta-alasta, joka lisäsi elementtien piilien sekä ylityspalkkien lisäraudoitusta.

Rakennjärjestelmäratkaisujen vaikutus on myös merkittävä ja tämä on nähtävissä etenkin Kuhmonkadun kampuksen osalta, jossa rakennuksen perustuksista aiheutuvien päästöjen osuus oli suurempi kuin verrokkina toimineilla betonirakenteisilla rakennuksilla. Kuhmonkadun kampuksen osalta tämä johtui osittain jäykistävien seinien suuremmasta määrästä

rakennuksen keskiosassa, kuin betonirakenteisilla pilari-palkki -järjestelmillä (Delta palkki) muissa tarkastelukohteissa. Rakennejärjestelmäratkaisujen ja rakennusosien lisäksi kyseisiin arvoihin vaikuttaa myös rakennuksen muoto.



Kuva 10. Laskettujen kohteiden elinkaaren päästöt bruttoneliötä kohden

### 3.1.4 Ympäristöministeriön arviointimenetelmän mukaiset tulokset kohteille

Ympäristöministeriön arviointimenetelmässä hyödynnetään kansallista päästöarvoa energiantuotannolle (sähkö ja lämpöenergia), joka ei ota huomioon sen tuotannon päästöjen paikkakuntakohtaista vaihtelua. Käytettäessä keskimääräistä päästöarvoa rakennuksen kuluttaman lämpöenergian osalta rakennusmateriaalien A1-3 osuus kokonaishiilijalanjälkeen korostuu. Osaltaan hiilijalanjälkeen vaikuttaa myös taulukkoarvojen käyttö A4, A5, B3-4, C1, C2 ja C3-4 elinkaaren vaiheissa: OneClick LCA:ssa tarkennetussa menetelmässä hyödynnetään materiaalikohaisia huolto- ja ylläpitojaksoja käyttöikien osalta sekä materiaalien osalta ennalta määritettyjen skenaarioiden kautta. Tällöin Kuhmonkadun kampus on vähäpäästöisin ja Nepeän koulu suuripäästöisin. Myös muihin kohteisiin nähden on sen asema heikentynyt B6 vaiheen vertailuperusteita yhtenäistettäessä (kuva 11).

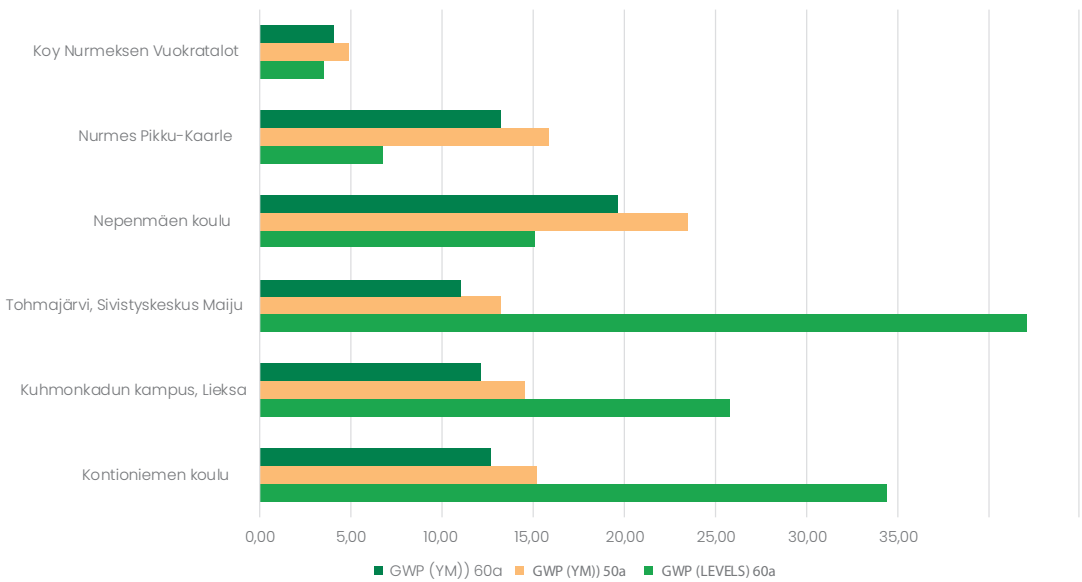
	Kontioniemen koulu, Kontiolahti	Kuhmonkadun kampus, Lieksa	Sivistyskeskus Maiju, Tohmajärvi	Nepeän koulu, Joensuu	Pikku-Kaarle päiväkot, Nurmes	Koy Nurmeksen vuokratalot, Nurmes
GWP, yhteensä kg CO <sub>2</sub> e	2120439	2053840	3401956	7309531	442461	138016,38
(kg CO <sub>2</sub> e / m <sup>2</sup> ) / a	15,19	14,84	13,23	23,54	13,49	4,90
kg CO <sub>2</sub> e / m <sup>2</sup>	759,5	742,00	661,50	1177	675	245,00
Huomiot					Ei sisällä energian-kulutustietoja	Ei sisällä energian-kulutustietoja

Kuva 11. Keskimääräisiä GWP-arvoja 50 vuoden tarkastelujaksolla YM:n arviointimenetelmän mukaan

### 3.1.5 Arviointimenetelmien erot tuloksien osalta

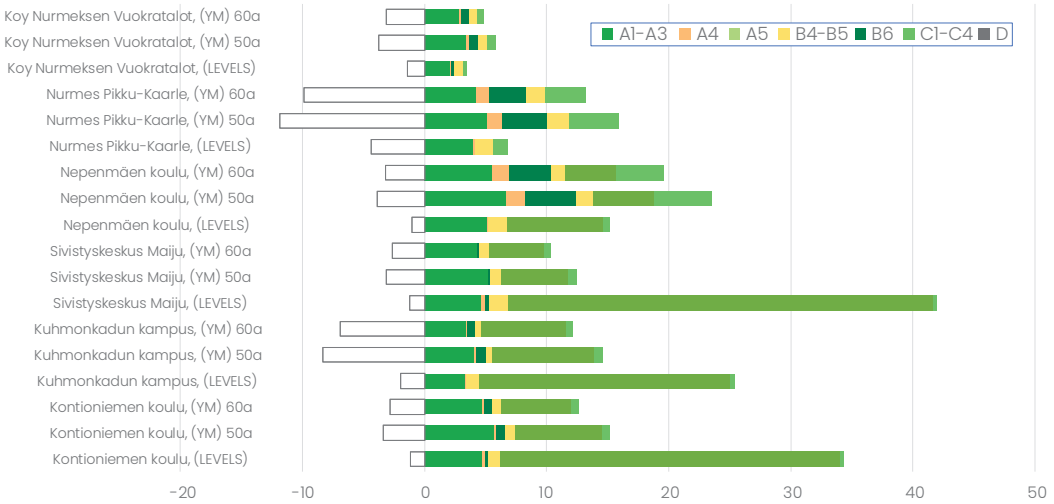
Ympäristöministeriön arviointimenetelmässä käytetään keskimääräisiä päästöarvoja niin verkkosähkön kuin kaukolämmön osaltakin. Kaukolämmön osalta ero on suurin paikkakuntaisiin arvoihin verrattuna ollen 0,0712 kg CO<sub>2</sub>e/kWh (kaukolämpö 2020–2070, 50 vuoden käyttöiälle) ja sadan vuoden käyttöiällä 0,0414 kg CO<sub>2</sub>e/kWh (Kuvat 12–13.). Tämä vaikuttaa suuresti etenkin B6 vaiheen päästötietoihin tasaten kohteiden keskinäisiä eroja.

Näiden kahden arviointimenetelmän tuloksia vertaillaessa on myös otettava huomioon, että tämän oppaan tekohetkellä EU Level(s) menetelmästä oli jo julkaistu uusi versio (Publication version 1.0). Tämä uusi versio ottaa huomioon myös energiantuotannon yksikköpäästöjen pienenemisen tulevaisuudessa uusien teknologioiden käyttöönoton kautta, toisin kuin tässä vertailussa sovellettu Beta-versio (Dodd ym. 2020).



Kuva 12. Sovellettujen arviointimenetelmien vaikutus tuloksiin

GWP100 kgCO<sub>2</sub>e/m<sup>2</sup>/a eri arviointimenetelmillä ja laskenta-ajanjaksoilla



Kuva 13. Kohdekohtaiset tulokset eri arviointimenetelmillä ja arviointijaksoilla.

## 3.2 Rakenneratkaisujen vertailu päästöjen näkökulmasta

**K**ohti vähähiilistä rakentamista – Joensuu Wood City –projektin yhtenä toimenpiteenä suunniteltiin asuinkortteliratkaisu, jonka avulla toteutettiin eri rakenneratkaisujen vertailua rakennuksen elinkaaripäästöjen näkökulmasta. Tavoitteena oli suunnitella olemassa olevien kaavamääräysten mukainen kaupunkiympäristöön soveltuva asuinkortteli olemassa olevalle tontille. Esimerkiksi soveltuva korttelialue löytyi Penttilänrannasta, joka sijaitsee Joensuussa Piellisjoen pohjoispuolella.

### 3.2.1 Joensuu Wood City -konsepti

Aikaisemmin Penttilänrannan alueella on ollut sahaus ja puunjalostustoimintaa. Toiminnan lakattua Joensuun kaupunki osti 33 hehtaarin suuruisen alueen vuonna 2018 Bonvesta Oy:ltä kaupunkimaisen uudisrakentamisen tarpeisiin. Uuden asuinalueen rakentamisen visiona on ollut kaupunkimainen, jokimaisemaa hyödyntävä ja historiastaan ylpeä asuin- ja työpaikka-alue, jonka energiankulutus ja ympäristökuormitus ovat esimerkillisen matalia. Penttilänranta on arkkitehtuuriltaan uudenlainen osa keskustaa (Kuvat 14–15). Talonrakentamisen osalta tavoitteena on ollut uudet innovatiiviset matalaenergiaratkaisut, jotka näin laajasti toteutettuina näyttäisivät suuntaa valtakunnan mittakaavassa. Lisäksi lämmitysenergian tuotannossa ja energian jakelussa tavoitteena on ollut etsiä uusia ja ympäristömyönteisiä ratkaisuja. (Joensuun kaupunki 2008).





Kuva 14. Havainnekuva Joensuun Penttilänrannan alueesta.



Kuva 15. Ote asemaakaavakartasta: esimerkkikorttelin sijainti.

RAKENNUSOIKEUS: 3100 K-M2  
 KERROSALA YHT: 1036+1028+1036=3100 K-M2  
 BRUTTOALA YHT: 1489+1430+1522=4441 M2  
 HUONEISTOALA YHT: 861+860,5+861=2582,5 H-M2 (83%)

Kuva 16. Korttialueen laajustiedot (Vaaka-Ark Oy)

Työnrajoituksina korttelista valittiin vain yksi tontti, joka oli rakennusoikeudeltaan yhteensä 3100 m<sup>2</sup>) (Kuva 16). Tontille laadittiin kaavamääräysten mukaiset arkkitehtisuunnitelmat kolmelle eri rakennukselle. Kuitenkin siten, että tarkempaan tarkasteluun otettiin ainoastaan yksi keskimäinen 4-kerroksinen asuinrakennus (Kuvat 17-18) Rakennukselle tehtiin rakennesuunnitelmat eri toteutusvaihtoehdoille, joita olivat puuranka-rakenne, CLT/LVL massiivipuurakenne, puu-betoni -hybridirakenteet sekä betonisandwich rakenne. Näitä toteutusvaihtoehtoja on kuvattu tarkemmin seuraavassa kappaleessa.

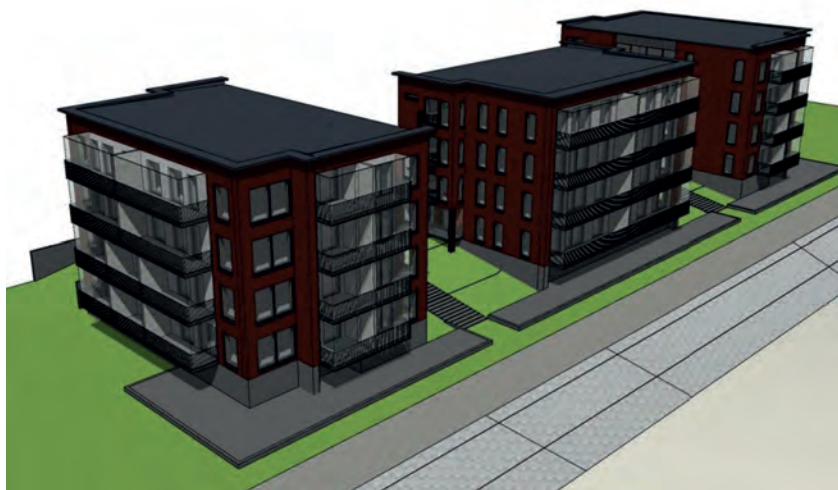
## TALO B

KERROSALA 245 + 261 K-M2 x 3 = 1028 K-M2  
 BRUTTOALA 259 + 277 + 298 M2 x 3 = 1430 K-M2

### KERROKSET 1.-4.

HUONEISTOT	1 KPL	1H+KT+ALK	22,0 M2
	1 KPL	1H+KT+ALK	33,0 M2
	3 KPL	2H+KT	31,0 M2
	3 KPL	2H+KT	41,5 M2
	4 KPL	3H+K	71,0 M2
	4 KPL	3H+K	76,0 M2
<b>YHTEENSÄ</b>	<b>16 KPL</b>		<b>860,5 M2</b>

Kuva 17. Arvioidun pilottikohteen tiedot (Vaaka-Ark Oy).



Kuva 18. Arkkitehtisuunnitelma havainnekuva suunnitelluista kolmesta asuin kerrostalosta (Vaaka-Ark Oy)

## 3.2.2 Rakennusosakohtainen arviointi luonnosvaiheessa

Rakennetyyppien sekä rakenneratkaisujen valinnan perusteena on käytetty konseptisuunnittelun tekohetkellä voimassa ollutta vaatimustasoa. Paloteknisen toiminnan osalta konseptialoa kuuluu P2 paloluokkaan. Toiminnallisia vaatimuksia määrittävät osaltaan Suomen rakentamismääräyksen kohdat C1 Ääneneristys ja melutorjunta rakennuksessa (1998), D3 Rakennusten energiatehokkuus (2012) ja E1 Rakennusten paloturvallisuus (2011).

Rakennevaihtoehtoihin tullaan jäljempänä viittaamaan yhdistelmä-tunnuksella (esim. C/C) sekä kirjainlyhenteillä W-wood (puu) sekä C-concrete (betoni) kantavien pääraakenteiden osalta. Ensimmäinen kirjain kuvaa pystyrakenteen pääasiallista materiaalia ja jälkimmäinen vaakarakenteiden pääasiallista materiaalia. Kuormitusvaihtoehtojen yhdistelmä-tunnus on esim. W/W2 1, jossa jäljessä oleva erillinen numero kuvaa kuormitusvaihtoehtoa. Yhdistelmä-tunnusten tarkemmat rakennusosakuvaukset ovat seuraavat:

### w/w

kantavat seinärakenteet: rankarunko (liimapuu)+jäykistävä levyitys  
vaakarakenteet: Kerto-Ripa avokotelolaatta

### w/w2

kantavat seinärakenteet: LVL tai CLT  
Vaakarakenteet: CLT

### c/c

kantavat seinärakenteet: raudoittamat betoniseinät  
(ympärysteräs+verkko molemmissa pinnoissa esim. T6#150)  
vaakarakenteet: ontelolaatasto O32  
(punostettuna jännevälin sekä kuormitusten mukaan)

### c/w

kantavat seinärakenteet: raudoittamat betoniseinät  
(ympärysteräs+verkko molemmissa pinnoissa esim. T6#150)  
vaakarakenteet: CLT

### w/c

kantavat seinärakenteet: LVL  
vaakarakenteet: ontelolaatasto O32  
(punostettuna jännevälin sekä kuormitusten mukaan)

Rakennevaihtoehtojen osalta päädyttiin yhdistämään markkinoilla nykyisin saatavilla olevia tuotteita sekä niiden variaatioita. Rakenneratkaisuilla on kuitenkin yhteisiä rakenteita, jotka eivät ole suurissa määrin riippuvaisia päärakennusmateriaalin valinnoista. Kyseisiä yhteisiä rakenteita ovat tällöin ensimmäisen kerroksen osittain maanalaiset perusmuurirakenteet, autohallin viereiset ulkoseinärakenteet, alapohjat, yläpohjarakenteet sekä väestönsuojarakenteet. Ensimmäisen kerroksen kantava holvirakenne on myös pääosin yhtenevä rakenneratkaisujen kesken toimiessaan kuormansiirtorakenteena kerroksien välisten seinien sijoituksen vuoksi. Puu-puu sekä hybridirakenteilla paksuus yleisesti 500 mm (myös väestönsuojan kohta), jota sovellettu myös betonirakenteiselle tyyppikerrostalolle. Todellisuudessa mahdollista olisi käyttää 300 mm paksua holvirakennetta betonirakenteisella kerrostalolla. Puu- ja hybridirakenteilla holvi toimii myös vetovoimille rakenteellisena vastapainona.

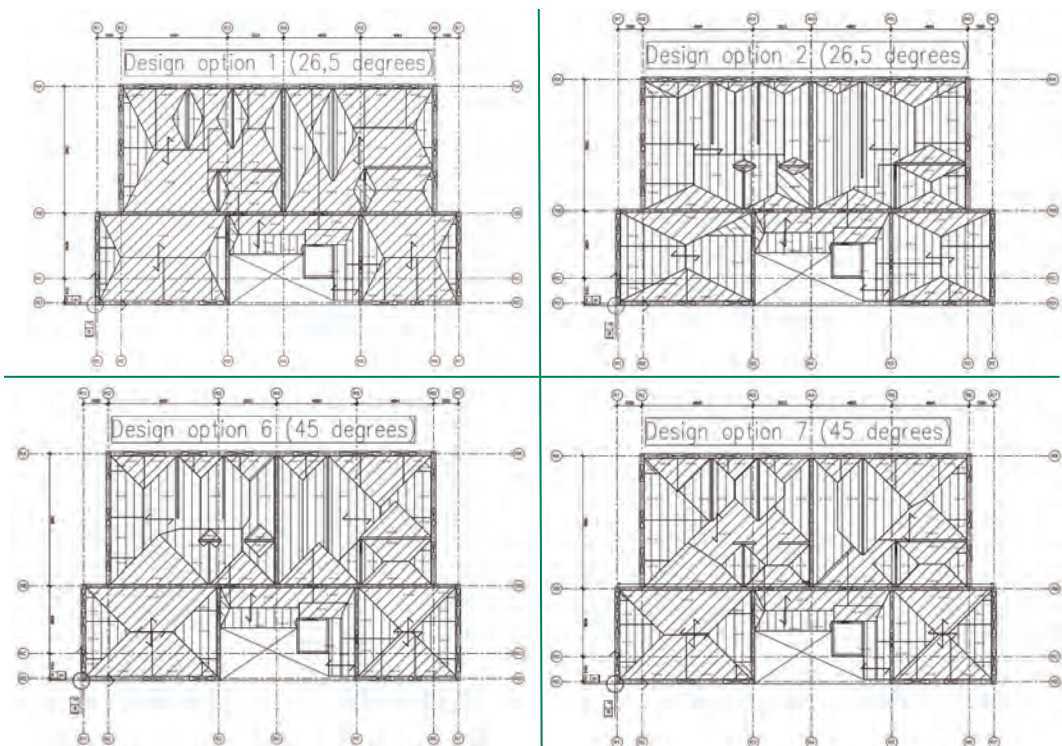
Rakenteiden luonnossuunnitteluvaiheessa seinien sijoittelusta on muodostettu eri kuormitusvaihtoehdot kuvaamaan välipohjalta tulevien kuormitusalojen muodostumista kantaville rakenteille (Kuvat 19–20). Yleisesti voidaan olettaa, että yhtenäiset paikallavalu- tai liittorakenteet voivat siirtää kuormia 45 asteen kulmassa raudoituksen sekä valukerroksen paksuuden ollessa riittäviä. Sen sijaan ontelolaatoilla kuormansiirto tapahtuu noin 27 asteen kulmassa, jonka voidaan olettaa olevan pätevä myös Kerto-Ripa ratkaisuille sekä CLT-levyrakenteille. CLT-levyrakenteiden osalta on alustavassa suunnittelussa kuitenkin huomioitava lamellien kokoonpano, joka vaikuttaa kuormansiirtokulmaan vaaka- ja pitkittäislamellien suhde 1:1 → 45 astetta ja <1:2 → 27 astetta. Kyseisiä yksinkertaistuksia on käytetty suunnittelussa huomioiden välipohjan pääkantosuunnat.

Rakenteellisen ja hiilijalanjäljen optimoinnin tavoitteet voidaan jakaa tällöin seuraaviin tekijöihin myös kuormitusvaihtoehtojen osalta:

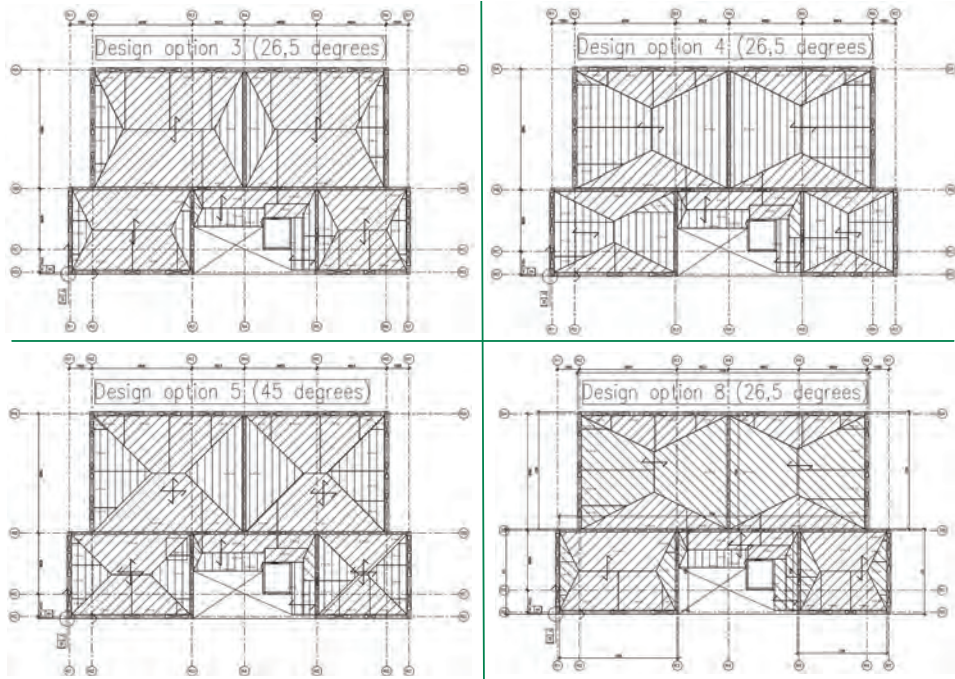
**TAVOITE 1:** Kuormien kerääntymisen minimointi sekä pienempien poikkileikkausten saavuttaminen (WW). Huoneistojen sisäisten seinien käyttäminen kuorminsiirrossa sekä kuormitusalojen pienentäminen. (Kuva 19).

**TAVOITE 2:** Muuntojoustavuuden saavuttaminen vähentämällä asuntojen sisäisiä kantavia sekä jäykistäviä seiniä (WW2, CC, CW ja WC) (Kuva 20).

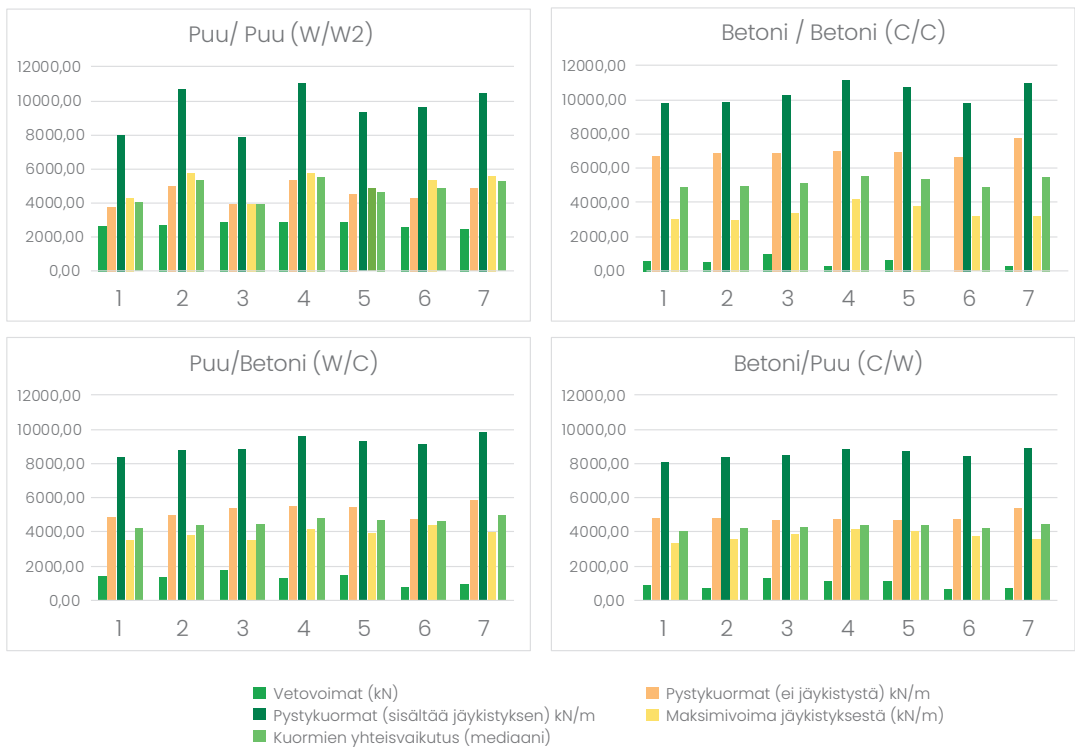
**TAVOITE 3:** Suunnittelujousto vaihtoehtoisten ratkaisujen toteuttamiseksi, rakenteiden käyttöasteisiin jätetään mahdollisuus lisäkerrosrakentamiseen. Huomioidaan järjestelmien yhdistelymahdollisuus, jolloin detaljiratkaisuja ei rajoiteta liikaa alkuvaiheessa.



Kuva 19. Jäykistävien seinien määrää on lisätty, jotta kuormien kertymistä saadaan pienennettyä.



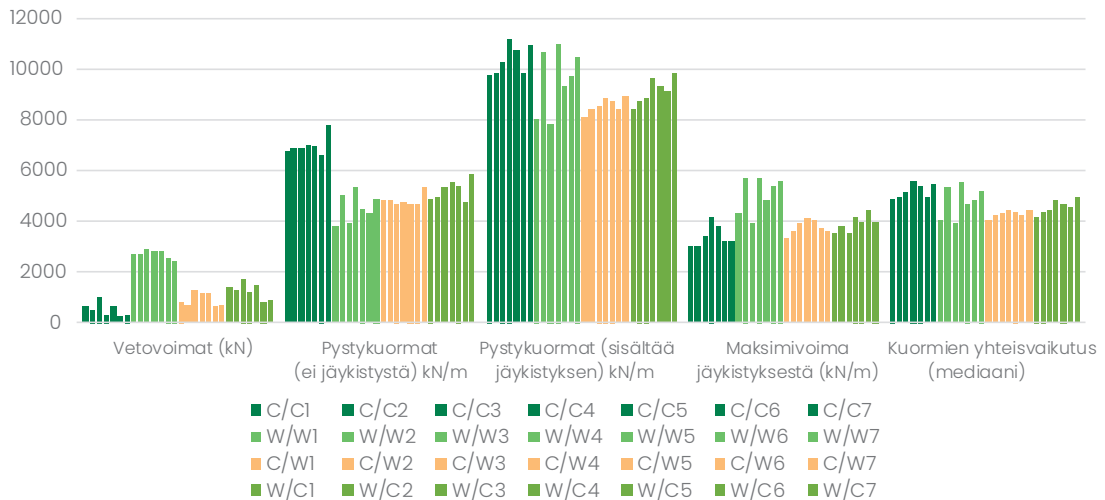
Kuva 20. Jäykistävien seinien määriä on vähennetty, jotta muuntojoustavuuden tavoitteet saadaan toteutumaan.



Kuva 21. Rakennevaihtojen jäykistyslaskennan tiedot

Tarkasteltaessa rakennevaihtoehtoratkaisujen vaikutusta rakennuksen kuormituksien osalta, voidaan huomata suurimman vaikutuksen olevan nimenomaan täysin puurakenteisesta täysin betonirakenteeseen siirryttäessä. Suurimpana vaikuttavana tekijänä on betonirakenteiden pystykuorman osuus, joka toisaalta vähentää vetovoimien esiintymistä (Kuva 21).

Puurakenteisella tyyppikerrostalolla vetovoimien osuus kuitenkin kasvaa ja jäykistyksestä aiheutuvat pystykuormat (tukireaktio) lisäävät rakennuksen kokonaiskuormitusta ollen lähellä hybridirakennerratkaisuja. Tällöin suunnittelujousto voidaan saavuttaa tarkastamalla eri vaihtoehtojen kokonaisvaikutus seinien alustavassa mitoituksessa. Toisaalta kuormille voidaan käyttää niiden yhteisvaikutusta mediaanina, joka tasaa kuormitusten sekä vaihtoehtojen huippupiikkejä (Kuva 22).



Kuva 22. Kuormitus- rakenneratkaisujen kokonaisvaikutukset

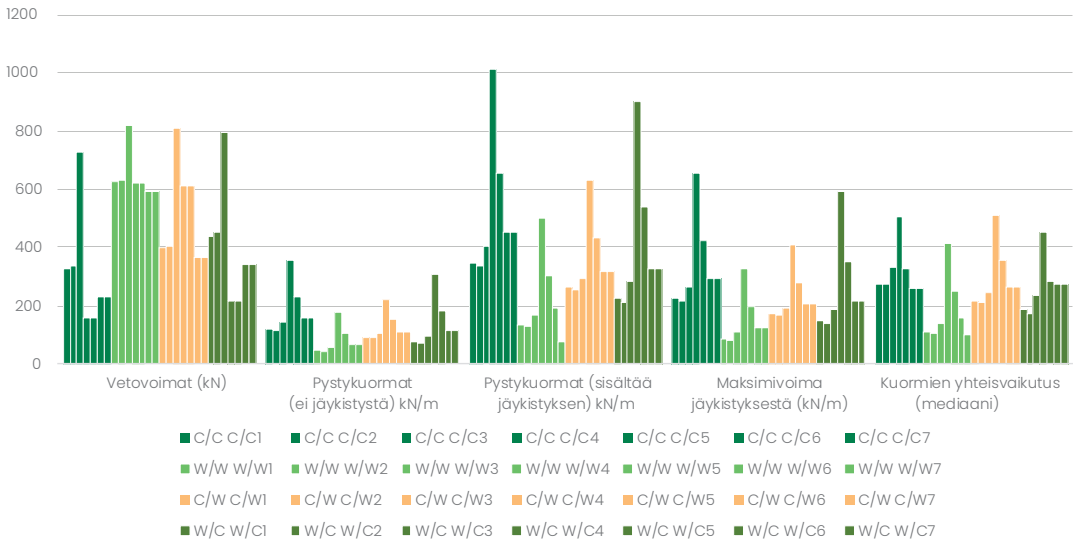
Tällöin voidaan valita suunnitelluille rakenneratkaisuvaihtoehdoille sen ominaisuuksin nähdä paras kuormitusvaihtoehto, kantosuunnat sekä seinien sijainnit. Kyseisistä kuormitusvaihtoehdoista voidaan luoda tavoitematriisi tavoitteiden ja kuormitusvaihtoehtojen pohjalta. Kuormitusvaihtoehtojen valinnan osalta voi kuitenkin tapahtua muutoksia vaihdettaessa pääasiallinen kantava runkorakenne välipohjan osalta esim. CLT välipohjan vaihto ontelolaataksi. CLT:lle on sopivampia, niin massiivi- kuin liittorakenteena, lyhyemmät jännevälit kun taas esijännitetyille ontelolaatalle pitkät jännevälit.

Vaikka jännepunosten määrä vähenisikin lyhyemmällä jännevälillä ei ontelolaatan kokonaispaksuus muutu rakennusosan kohdalla mm. ääniteknisistä syistä. Ontelolaatan hiilijalanjäljestä betoni (C40/50) muodostaakin merkittävimmän osan jännepunosten osuuden ollessa vähäinen. Tämä muistutuksena rakenneratkaisujen vaihtoehtoja pohtiville hiilijalanjäljenlaskijoille.

Kuormitusvaihtoehtoista voidaankin todeta, että vaihtoehdot, joissa on suuri määrä kantavia seiniä (myös huoneistojen sisäiset) johtavat yleensä pienempiin pystyvoimiin, kun jäykistyksessä aiheutuvia voimia ei oteta huomioon. Otettaessa jäykistysvaikutukset huomioon tasaantuvat pystykuormien erot (huomioitava myös vetovoimien osuus). Tällöin voi olla kannattavampaa kerryttää kuormia huoneistojen välisille seinille, joiden suurempaa suhteellista poikkileikkausta määrittää lisäksi ääni- ja palotekniset vaatimukset (kuormitus-

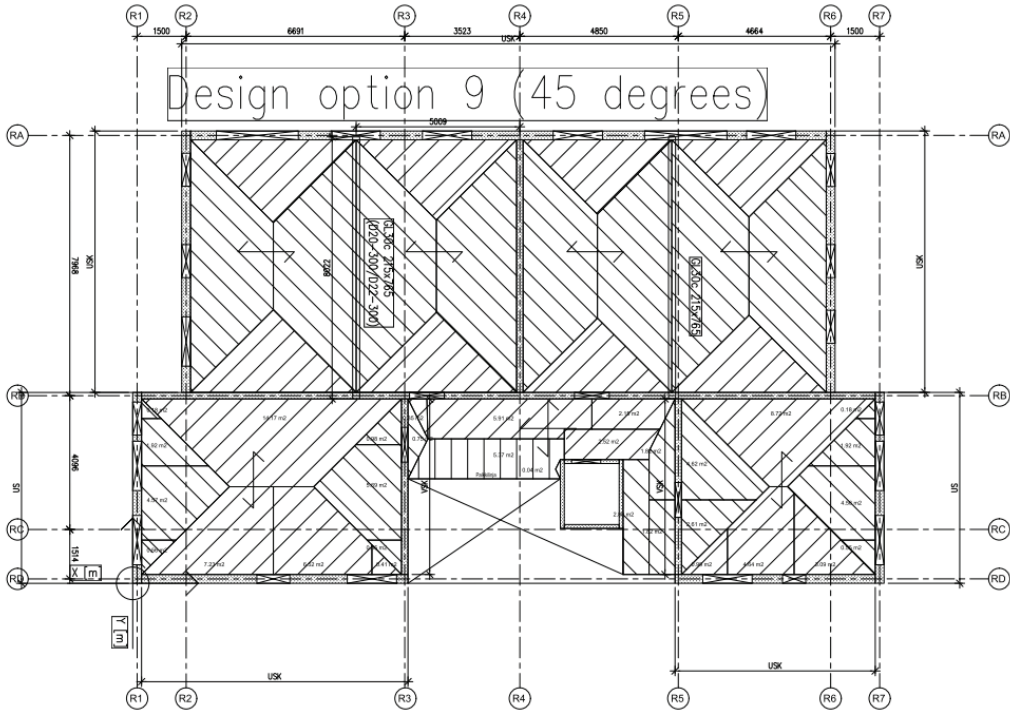
vaihtoehtot 3, 4, 5 ja 8). Muuntojoustavuuden sekä suunnittelujouaston vaatimukset täyttyvät kuormitusvaihtoehtoilla 3, 4 ja 8. Kuormitusvaihtoehto 8 onkin yhdistelmä 3 ja 4 osalta.

Muuntojoustavuuden lisääminen aiheuttaa osaltaan kuormien kertymistä päälinjojen kantaville runkolinjoille esim. R4/ RA-RB (X-11), jolloin karkean tarkastelun lisäksi tulee aina tehdä myös yksittäisten pääkantolinjojen tarkastelu. Kyseiset vaikutukset ovat nähtävissä kuvassa 23, jossa huomataan vaakavoimien vaihtelut kuormitusvaihtoehtojen välillä. Tämä johtuu osaltaan rasisuunnassa olevien seinien määrästä, kun voimat on jaettu niille seinien jäykkyyksien suhteessa (välipohjan oletus jäykkä tai osittain jäykkä), sekä lisävaakavoiman aiheuttavan pystykuorman suuruudesta. Lisävaakavoimat aiheutuvat rakenteiden vinoudesta, sijaintivirheistä ja kuormien epäedullisista vaikutussuunnista.



Kuva 23. Jäykistysseinä x-11 kuormitusvaihtoehtojen mukaiset kuormitukset

Tässä oppaassa ei tarkastella jatkuvan sortuman vaatimuksia tarkemmin, mutta sen vaatimukset on tunnistettava osana suunnittelua etenkin avainasemassa olevien rakenteiden osalta, joka vaikuttaa osaltaan kantavien rakenteiden hiilijalanjälkeen. Toisaalta voi olla tarpeen harkita myös kuormitusvaihtoehdon 9 (Kuva 24) mukaista tilannetta jatkuvan sortuman näkökulmasta moduulilinjalta R4/RA-RB, jolloin poistettaessa seinä moduulinjalta R4 toimii välipohja ulokkeena. Kyseinen rakenneratkaisu lisää kuitenkin laattaston alapuolisen kantavan palkin, joka tulisi huomioida toimivan liittorakenteen tapaan poikkileikkauksen korkeuden pienentämiseksi.



Kuva 24. Vaihtoehtoinen ratkaisu, joka täyttää suunnittelutavoitteet kuormien kertymisen sekä muuntojoustavuuden osalta.

Toisaalta asuntojen sisäisten seinien muuttaminen ei kantaviksi vähentää niiden kokonaispaksuutta tai jäykistävien levytysten määrää. Tämä osaltaan tasaa kerroskohtaista hiilijalanjälkeä, koska välipohjien mitoituksessa on jo huomioituna kevyet väliseinät ( $g_k=0.5 \text{ kN/m}$ ). Muuntojoustavuus edistää toisaalta myös tilojen käyttötarkoituksen myöhempää muuttamista, etenkin toimisto tai monikäyttötarkoituksen tiloiksi, kun asuinkerrostalo sijaitsee lähellä kasvukeskustaa. Kyseiset seikat tulee huomioida myös mm. välipohjien hyötykuormien osalta jo rakennesuunnittelussa, jos tähän päädytään jo tarve- tai hankesuunnitteluvaiheessa.

Esimerkkinä käyttötarkoituksen muutoksen vaikutukset välipohjien kuormituksiin kuormitusluokittain (Suomen rakentamismääräyskokoelma, Rakenteiden lujuus ja vakaus 2019, 5)

Luokka A, asunto- ja majoitustilat  $q_k \text{ (kN/m}^2\text{)}$

-Välipohjat  $2,0 \text{ kN/m}^2$ , portaat  $2,0 \text{ kN/m}^2$  ja parvekkeet  $2,5 \text{ kN/m}^2$

-Pistekuormat  $Q_k \text{ (kN)}$  (portaat suluissa),  $2,0 \text{ (2,0)}$

Luokka B, toimistotilat  $q_k \text{ (kN/m}^2\text{)}$

-Välipohjat  $2,5 \text{ kN/m}^2$ , portaat  $3,0 \text{ kN/m}^2$  ja parvekkeet  $2,5 \text{ kN/m}^2$

-Pistekuormat  $Q_k \text{ (kN)}$  (portaat suluissa),  $2,0 \text{ (2,0)}$

Toisaalta hyötykuorman neliökohtaisen arvon osalta muutos on suhteellisen pieni kantavien pystyrakenteiden osalta matalilla kerrostaloilla. Välipohjarakenteilla sen sijaan vaikutus on suurempi. Betonirakenteiden mitoituksen osalta se vaikuttaa lähinnä murtorajatilan kantavuuteen sekä pysyvien kuormien osalta käyttörajatilan taipumiin/siirtymiin.



Puuvälipohjarakenteilla korostuu sen sijaan mitoituksessa useammin värähtelymitoitus ja käyttörajatilan taipumat/siirtymät. Karkeassa tarkastelussa kuormitusluokan muutos ei kuitenkaan vaikuta merkittävästi tyyppikerrostalon rakenteisiin tai kokonaiskuormiin, jolloin kyseinen seikka on kannattavaa ottaa huomioon alkuvaiheen suunnittelussa. Jos kuormitusluokkaa tai materiaaleja vaihdetaan luonnossuunnitteluvaiheessa, tulee kuormitukset tarkastaa ja tarvittaessa muuttaa rakenteet vastaamaan viimeisintä suunnitteluratkaisua.

### 3.2.2.1 Perustukset

Vertailtavien rakenneratkaisujen oletuksena on, että kellarikerroksen sekä ensimmäisen kerroksen lattiarakenteet mukaan lukien perustusrakenteet eivät ole hiilijalanjälkioptimoinnin kohteena. Kyseistä tutkimuksellista ratkaisua tukevat kohteeseen tehdyt jäykistys- sekä rakennelaskelmat, joiden perusteella perustustasolla vaikuttavat kuormitukset ovat hyvinkin samansuuruisia kokonaiskuormituksia tarkasteltaessa. Vaihtelua tapahtuu rakenneratkaisujen välillä lähinnä siinä, miten pystysuuntaiset voimaresultantit muodostuvat. Betonirakenteisella (CC) kerrostalovaihtoehdolla pystykuormien osuus on tuulikuormasta ja jäykistyksestä tuleviin lisävoimiin nähden suurempi. Sen sijaan niin puu-puu- (WW ja WW2) kuin hybridiratkaisuilla (CW ja WC) muodostuvat jäykistyksestä aiheutuvat tukireaktivoimat pystyvoimien alustavaa arvoa suuremmiksi. Lopulta kyseisten voimien keskimääräiset arvot tasaavat toisiaan, jolloin tämän tutkimuksen puitteissa voidaan todeta, ettei rakenneratkaisuilla ole lopulta merkittävää vaikutusta paalutuksella toteutettavissa kohteissa. Rakenteiden pysyvien kuormien eli pääasiassa omapainon suuruus vaikuttaa kuitenkin esiintyviin vetovoimiin perustustasolla, jota voidaan arvioida esim. vetoraudoituksen tai ankkurointiosien aiheuttaman hiilijalanjäljen kautta.

Paaluanturoilla määrävämpänä hiilijalanjäljen kannalta voidaan pitää sitä, että vakiopaaluanturoiden kokoa määrittävät niin anturan korkeus (paalun lävistys/ läpileikkautuminen anturasta) kuin paalujen minimi keskinäinen etäisyys. Tällöin suunnittelija voi optimoida rajallisesti perustusten hiilijalanjälkeä vertaamalla paaluparin tai jatkuvan paaluanturan toteutuksen vaikutuksia. Toteutettaessa perustukset paalupareina sekä käyttäen yläpuolista seinärakennetta seinämäisen palkin tapaan ovat kokonaisraudoitusmäärät lopulta hyvinkin lähellä jatkuvana paaluanturana tehtävää toteutusta.

Suurimmaksi eroksi muodostuu lähinnä betonin lisääntynyt menekki jatkuvana paaluanturana toteutettaessa, jonka suhteen raudoituksen hiilijalanjälkeä sekä kustannuksia tulee vertailla kokonaisuuden kannalta (muotitukset, raudoitustyö, materiaalimenekit sekä hukka). Paaluanturoille perustettaessa ei huomioida tässä tutkimuksessa maatäyttöjen edullista tukevaa vaikutusta. Mahdollisuus maatäyttöjen painumiselle on olemassa ja tällöin paalut jäivät kantamaan tukina sekä paalujen väliset yhdistävät rakenteet voidaan olettaa yksinkertaistettuna toiminnaltaan palkeiksi.

Esimerkiksi käytettäessä kahden paalun vakiopaaluanturan keski-etäisyytenä 2,2 metriä on vaihtoehtona käyttää paaluanturoiden välistä teräsbetonivalua tai välttää jatkuvuus mitoittamalla seinä pistemäisesti tuettuna. Tarkasteltaessa tuloksia näyttää siltä, että hiilijalanjäljen sekä kustannuksien kannalta olisi järkevämpää suosia seinämäisen palkin käyttöä kyseisessä tapauksessa.

Raudoitusmäärät poikkileikkauksessa yhden metrin matkalla. Huomioitavaa on, että halkeilu- ja minimiraudoitus on sama kummallakin tavalla toteutettaessa teräsbetoniseinällä:

Seinämäinen palkki, raudoituksessa lisänä ylä- ja alapinnan pääraudoitus. Pääraudoitus  $A_s = \sim 3000 \text{ mm}^2/\text{m}$  eli esim. 6T25 tai 10T20 ( $A_s = \sim 3000 \text{ mm}^2$ ). Hiilijalanjälki harjateräs  $0,5 \text{ kg CO}_2\text{e}/\text{kg} * (\text{geneerinen tieto})$  eli T25=3,85 kg/m  $\rightarrow 3,85 \text{ kg}/\text{m} * 6 \text{ kpl} * 1\text{m} = 23,1 \text{ kg} \rightarrow 23,1 \text{ kg} * 0,5 \text{ kg CO}_2\text{e}/\text{kg} = 11,55 \text{ kg CO}_2\text{e}$

Jatkuva paaluantura pääraudoitus 20T16 ( $A_s = \sim 4000 \text{ mm}^2$ ) +haat esim. UH. T10k150. Raudoitusmäärä yhteensä  $4,2 \text{ m} * 0,617 \text{ kg}/\text{m}$  (T10) = 2,6 kg ja pääraudoitus  $20 \text{ m} * 2,47 \text{ kg}/$

$m(T16) = 49,4 \text{ kg} \rightarrow (2,6 \text{ kg} + 49,4 \text{ kg}) * 0,5 \text{ kg CO}_2\text{e/ kg} = 26,0 \text{ kg CO}_2\text{e}$ . Lisäksi betonin hiilijalanjälki  $0,8 \text{ m}^3 * 1,5 \text{ m}^3/\text{m} = 1,2 \text{ m}^3 \rightarrow 1,2 \text{ m}^3 * 214 \text{ kg CO}_2\text{e/ m}^3 = 278,2 \text{ kg CO}_2\text{e}$ .

Tällöin voidaan todeta, että hiilijalanjäljen näkökulmasta on järkevämpää raudoittaa korkean poikkileikkauksen omaavaa seinämäistä palkkia (lisä  $11,55 \text{ kg CO}_2\text{e/ m}$ ) ennemmin kuin matalan poikkileikkauksen jatkuvaa paaluanturaa ( $304,2 \text{ kg CO}_2\text{e/m}$ ). Erotukse-  
na vaihtoehtojen välille muodostuu tällöin  $292,65 \text{ kg CO}_2\text{e/ m}$  eli koko tyyppikerrostalon tasolla vaikutus olisi karkeasti  $30\,179 \text{ kg CO}_2\text{e}$ . Kyseinen tilanne silloin kun kapasiteetiksi oletetaan paaluanturoiden maksimi mitoituskapasiteetti  $2,2$  metrin keskinäisellä etäisyydellä. Tilanne voi kuitenkin muuttua käytettäessä usean paaluryhmän paaluanturaa tai ryhmittämällä paaluja paaluparista poikkeavalla sijoituksella.

### 3.2.2.2 Kantavat runkorakenteet ja julkisivu

Tyyppikerrostalon ulkoseinän lämmöneristeen hiilijalanjäljen tarkastelun osalta rajautuvat pois orgaanisista materiaaleista valmistetut mm. puukuitueristeet. Tämä johtuu siitä, että suurin osa puukuitueristeistä ei täytä luokkavaatimusta ollen palavia lämmöneristeitä (E- luokka). Palavia lämmöneristeitä ei saa käyttää P2-paloluokan yli 2-kerroksissa rakennuksissa (eristeet yleensä vaatimus A2-s1, d0) ja parhaimmillaankin puukuitueristeitä on saatavilla luokassa B (esim. THERMOFLOC). Tällöin vertailua suoritetaan tarkemmin kohdan "4.8 Kantavien rakennusosien optimointi - vaakarakente" mukaisesti.

Luonnossuunnitteluvaiheen jälkeen, kun rakenteet on määritetty karkealla tasolla, voidaan siirtyä tarkennettuun määrälaskentaan. Kyseisen tarkennetun määrälaskennan vaiheen voidaan nähdä vastaavaan urakkalaskentavaihetta, jolloin seinärakenteiden todelliset korkeudet sekä välipohjarakenteiden rakenteet tarkentuvat.

Tyyppikerrostalon osalta tavoitteellisina yksikköinä pidetään rakenneratkaisujen välillä: (1) vapaata huonekorkeutta (korkeus oltava vähintään  $2750 \text{ mm}$  ja vaihteluvälinä  $+/- 50 \text{ mm}$ .) sekä (2) bruttopinta-ala/kerrosala ulkoseinän ulkopintaan (ilman lisärakennusoikeuden huomiointia  $250 \text{ mm}$  paksuuden ylittävältä osalta). Tällä yksinkertaistetaan energialaskennan tavoiteoptimointia säilyttämällä mm. ulkovaipan pinta-ala samana. Toisaalta huoneistoalat voivat pienentyä rakenteiden sallittaessa levitä sisätiloihin päin vaikuttaen mm. huoneistoalajahjalta laskettavaan myyntituottoon.

Tyyppikerrostalon julkisivun aukkojen pinta-alat pidettiin yhtenäisenä, jolloin vältettiin mm. ikkunapenkki- ja aukkojen kokojen kautta tapahtuva rakenteellisten määrien lisääntyminen tai vähentyminen. Aukotuksen pinta-alojen vaikutuksia käydään tarkemmin läpi energiatehokkuuden osalta. Ulkoseinälinjojen osalta aukkojen ylityspalkkien sekä piilien tarkastelu suoritettiin käyttäen rakennusmallin kokonaistarkastelua (Dlubal RFEM) puurakenteiden osalta sekä yleisillä raudoitusperiaatteilla kantavan betonisisäkuoren osalta. Raudoitusperiaatteiden tietoina käytettiin vastaavien kohteiden keskimääräisiä raudoitustietoja, jotta tutkijan vaikutus olisi vähäisempi valinnoissa.

Ulkoseinälinjojen osalta rakenteita olisi edelleen voitu optimoida poikkileikkauksen osalta käyttämällä ei pääkantosuunnilla olevien seinien sijalla ei- kantavia ulkoseinä-rakenteita. Tällöin kyseiset seinärakenteet vastustaisivat vain seinälinjalta kertyviä kuormia (omapaino) sekä julkisivun vaakakuormia (tuuli), jolloin niiden osuutta rakennuksen kokonaisjäykistykseen ei voitaisi pitää suurena.

Konseptikerrostalossa on kuitenkin päädytty siihen, että kaikki seinälinjat ovat käsiteltävissä kantavina- ja jäykistävinä seinälinjoina. Syynä tähän on, että ohennettaessa seinärakenteen paksuutta on lisättävä mm. U-arvon saavuttamiseksi ulkopuolisia eristysrakenteita. Toisaalta ulkoseinille voidaan olettaa kohdistuvan myös vaakarakenteilta tulevia kuormia, jolloin säilyttämällä seinärakenteiden paksuudet samana vältetään ylityspalkkien sekä piilien paikallisilta vahvistuksilta. CLT- ja LVL massiipuorakenteilla toteutustavasta riippuen voidaan julkisivun aukkojen toteutus tehdä CNC-työstämällä aukot pois master-

paneelista tai käyttämällä erillisiä ylityspalkkeja aukkojen kohdilla. Työstämällä aukot suoraan pois paneeleista lisääntyy hukka aukkopalojen osalta niiden mennessä haketukseen sekä energiaksi, mutta jäykistysominaisuudet ovat paremmat yhtenevän momenttia siirtävän ylityspalkin ansiosta. Vaihtoehtoisesti suuremmat hukkapalat esim. parvekeaukkojen kohdilta voidaan käyttää käytävän välipohjarakenteessa, jossa värähtelyvaatimukset ovat pienemmät. Erillistä ylityspalkkia käytettäessä kokonaishukan osuus pienenee, mutta ellei ylityspalkin kiinnitystapa ole täysin jäykkä heikkenevät hieman seinän jäykistysominaisuudet.

Kyseinen ratkaisu tarjoaa myös muuntojoustavuuden näkökulmasta vaihtoehtoisen kuormareitin rakennettaessa lisäkerroksia. Tällöin mitoitettaessa kantavat väliseinärakenteet tulevaisuuden suuremmille kuormille, voidaankin kantosuuntien vaihdoksella kerryttää kuormat tulevaisuudessa reservissä oleville kantaville ulkoseinälinjoille. Kuormien kantosuuntia voidaan tarvittaessa myös vuorotella lisäkerroksien välillä, jolla voitaisiin välttää kuormien liiallinen kertyminen ulkoseinien osalta esim. aukkojen pielille.

### 3.2.2.3 Kantavat välipohja ja yläpohjarakenteet

Rakennerratkaisujen periaatteena vaakarakenteiden osalta on, että niiden tulee täyttää rakenteelliset vaatimukset mm. kantavuuden, palonkeston sekä värähtelyn osalta. Tämä on osaltaan ohjannut suunnittelijavalintoihin, joissa on pyritty käyttämään yleisemmin käytettäviä välipohjaratkaisuja. Esimerkiksi betonirakenteisessa kerrostalossa välipohja voidaan toteuttaa niin paikallavaluna, ontelolaattavälipohjana O37 tai O32 kelluvalla pintavalulla. CLT- välipohjien osalta rakenteet voidaan toteuttaa niin liittolaattarakenteena kuin CLT- massiivielementillä, jossa on käytetty yhdistelmänä niin kelluvaa pintavalua kuin alapuolisia levyrakenteita ilma- ja askeläänen hallitsemiseksi. Toisaalta vaihtoehtona on käyttää rankarunkoisella vaihtoehdolla esim. ripalaatta välipohjaa.

Kullakin vaihtoehdolla on etunsa sekä haittansa. Ripalaatta rakenteet ovat hyvinkin tehokkaita hiilijalanjäljen näkökulmasta, mutta lisääntynyt välipohjan korkeus lisää rakennuksen kerroskorkeutta samalla. Toisaalta ontelolaatastoilla voidaan vähentää kerroskorkeutta hiilijalanjäljen kustannuksella, mutta hiilijalanjäljen vaikutukset alkavat tasoittua niin CLT- kuin ripa vaihtoehtoon siirryttäessä suuremmilla jännevälipituuksilla.

Projektin konseptikerrostalolle tehtiin vaihtoehtojen mukaiset rakennelaskelmat sekä tarkastettiin myös vaatimuksenmukaisuuden täytyminen. Tehtyjä ratkaisuja verrattiin myös yleisesti saatavilla oleviin rakennetyyppikirjastoihin (mm. RunkoBES, Dataholz, Puuinfo). Mitoituksen kannalta poikkeuksena toimi kuitenkin ontelolaatasto, jonka mitoitus toteutettiin taulukkomitoituksena/ kuvaajasta. Ontelolaatastoille oli kuitenkin saatavilla vain yleinen geneerinen EPD tieto, joka ei ottanut huomioon jännepunosten määriä.

Akustiset ja äänitekniset tekijät ovat osaltaan tärkeitä vertailtaessa rakenteita keskenään, kun halutaan mahdollistaa sisäympäristöltään toimivia tiloja/rakennuksia. Huomiota on kiinnitettävä rakennerratkaisujen osalta etenkin väliseinien sekä välipohjien äänitekniiseen toimivuuteen. Tietyissä tapauksissa myös ulkoseinien ääneneristävyydelle on asetettu tarkempia vaatimuksia esim. tie- tai raideliikennemelun johdosta.

Massiivisissa betonirakenteissa akustiset vaatimukset huoneistojen välillä täyttyvät yleensä käytettäessä ontelolaattavälipohjaa (O37), pintavalulla 50 mm tai massiivilaattaa vähintään 260 mm paksuna. Huoneistojen väliset seinät raudoittamattomia kantavia betoniseinäelementtejä, joiden paksuuden suositus on 200 mm. Teräsbetoniulkoseinien suosituksena asuinkerros- ja rivitaloissa on sen sijaan 150 mm rakennevahvuus (elementtisuunnittelu.fi).

Puurakenteisissa palkisto, ranka- kuin massiivirakenteisissa vaaka- ja pystyrakenteisissa akustiikka pyritään hoitamaan käyttämällä levyrakenteita, valurakenteita tai kaksoisra-

kenteita. Näiden rakenteiden vertailussa on tärkeää tunnistaa mikä on tarkasteltavan materiaalin tiheys sekä miten se liittyy viereisiin rakenteisiin, jotta hiilijalanjäljen tarkastelussa osataan kohdistaa vastaavat ominaisuudet oikeisiin rakennekerroksiin/tuotteisiin.

Kelluva lattiarakenne on akustisen toimivuuden kokonaisuuden kannalta turvallisempi ei kelluviin lattiarakenteisiin verrattaessa. Ei kelluvien lattiarakenteiden osalta on suurempi merkitys mm. liittymädetaljeilla muihin rakenteisiin ääneneristysvaatimusten saavuttamisessa. Rakennekerroksien vaihdolla on silloin vaikutusta mm. konsolirakenteissa, joissa voi tulla tarpeen miettiä tärinäeristimien käyttöä välipohjan ja kannatinkonsolin liittymässä, ellei käytetä esim. "huone huoneessa" periaatetta äänen sivutiesiirtymien välttämiseksi. Tästä syy-seuraussuhteesta tulee olla tietoinen myös haettaessa vähähiilisempiä materiaalivaihtoehtoja kyseisille rakenteille. Materiaalien vaihtoa ilman kokonaiskuvan huomiointia tulisi välttää vähähiilisintä ratkaisua haettaessa.

Puuvälipohjien osalta voidaan käyttää kelluvaa tai ei kelluvaa lattiarakennetta. Ilman kelluvaa lattiarakennetta olevat rakenteet voivat olla liittolaattarakenteita (CLT/LVL+ kiinnikkeet+ rauditus+ betoni) tai Ripa- elementtivälipohjia, joissa massaa on lisätty käytämällä esim. lattiakipsilevyä tai kipsivaluja. Esimerkkinä puurakenteisen välipohjan päälle tehtävä kelluva pintalattiarakenne eristekerroksen päälle (askeläänieriste, hiekka ym.) Vaihtoehtona on käyttää rakenteessa tällöin askeläänen parantamiseksi massarakenteita, joilla kullakin on hieman erilaiset vaadittavat rakennepaksuudet sekä hiilijalanjälki. Esimerkin vuoksi alle on otettu joitain esimerkkejä vaikutuksista kelluvan rakenteen osalta hiilijalanjälkeen. Toiminta yhdessä muiden rakenteiden kanssa tulee varmistaa ilma- ja askeläänen sekä värähtelyvaatimusten täyttämiseksi esim. yhdessä alakattorakenteen tai alapuolisten levytysten kanssa.

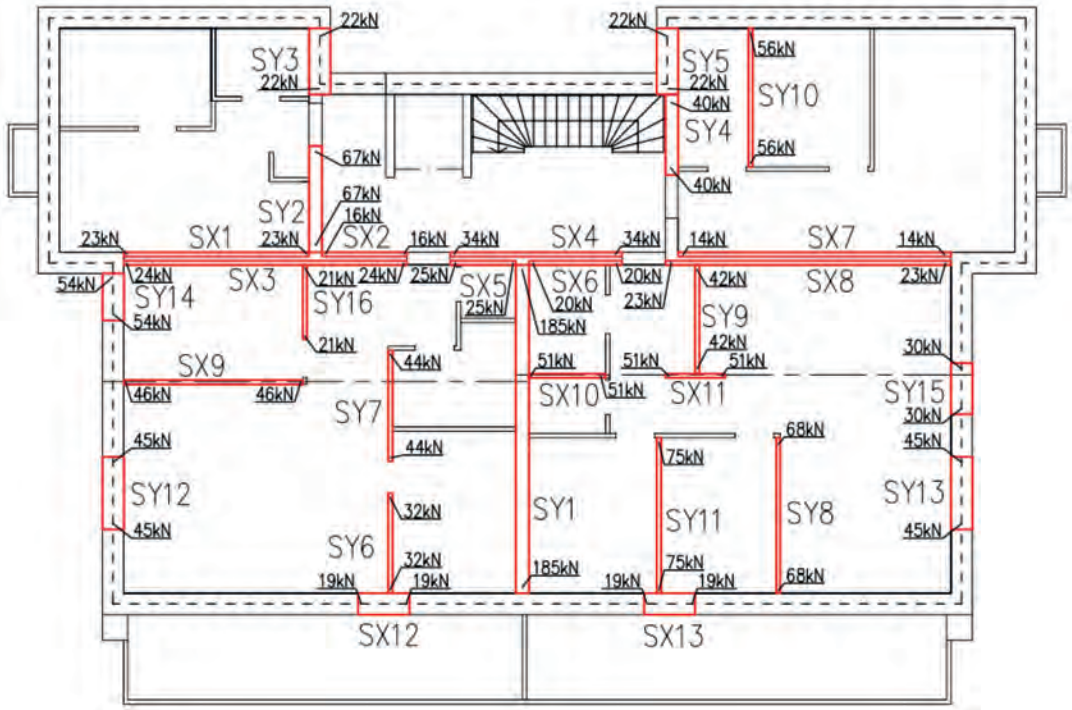
Kelluva pintarakenne, joka täyttää vaatimukset massiivisella raskaalla välipohjalla kuten teräsbetoni-laattalla ei sovellu paksuuden tai materiaalin osalta suoraan kevyemmille välipohjarakenteille kuten puuvälipohjat. Kyseinen askeläänen vähennysarvo voi olla ilmoitettuna kelluville pintarakenteille valmistajien toimesta esim. ?Lw (EN ISO 717-2) arvona, joka voi olla todellisuudessa pienempi puurakenteilla kuin betonirakenteilla käytettäessä. Todellisuudessa kyseinen arvo sisältää välipohjarakenteen muutkin kerrokset yhdessä vaikuttaen kuten kantavan rakenteen, eristekerrokset sekä kelluvan pintarakenteen. Pintarakenteen optimoinnissa on myös huomioitava mm. lämmitysputkien ja kaapeleiden aiheuttama lisä rakennepaksuuksissa sekä äänen pistemäiset sivutiesiirtymäreitit johtuen mm. kiinnikkeistä.

### 3.2.2.4 Konseptikerrostalon rakenteet

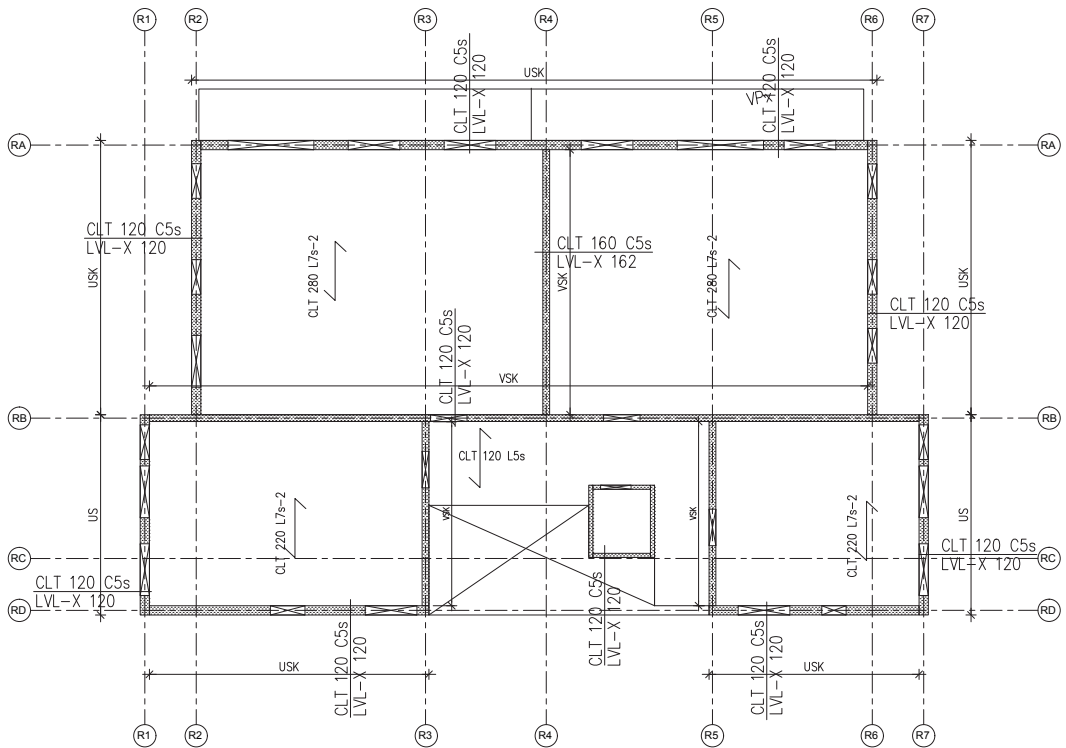
Tällöin tyyppikerrostalon osalta on päädytty kuvien X-X mukaisiin rakenneratkaisuihin, joissa on jätetty mahdollisuus myös lisäkerrosrakentamiselle vuorottelemalla tai muuttamalla ylempien kerroksien vaakarakenteiden päkäntösuuntia.

Kuvissa on esitettyinä periaatteet jäykistysseinien sijoitusperiaatteille sekä välipohjarakenteille. Rakennevaihtoehtoa C/W ei ole tässä esitettyinä, koska se on yhdistelmä W/ W 2 (välipohjat) (Kuva 26.) sekä C/C (seinät) (Kuva 27.) rakenteita ja joiden periaatteet ovat esitettyinä. Määräavimpänä rakennevaihtoehtojen osalta voidaan nähdä kuitenkin ontelolaattarakentamisella kantavassa suunnassa oleva vähimmäistukipinnan pituus 60 mm sekä tarvittavan ripustus- ja gasraudituksen vaatima ala.

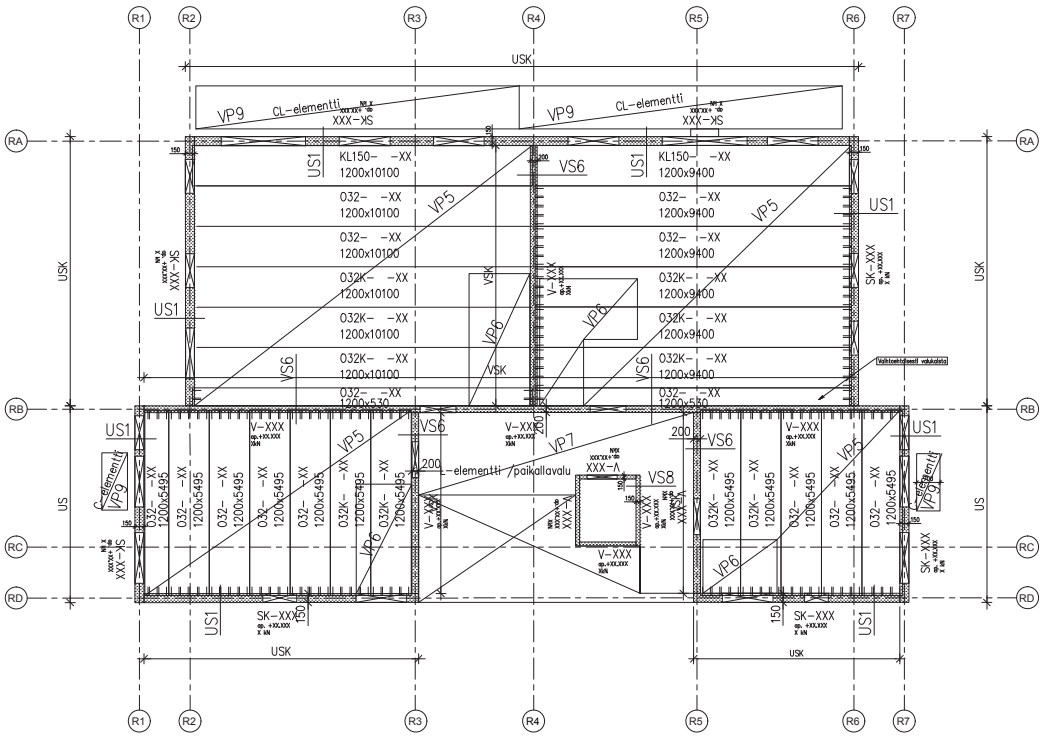
Kyseinen tilanne tulee eteen myös CLT- sekä ripalaatan osalta, jossa on päätettävä, viettäkö laatta suoraan tuelle seinälle vai käytetäänkö erillistä konsolia seinässä. Erillisen konsolin käyttö lisää materiaalimenekkiä, mutta sallii pienemmän seinän poikkileikkauksen käytön tukipinnan osalta. Toisaalta konsolin käyttö aiheuttaa kuorman epäkeskisyyttä seinän yläpäässä etenkin ulkoseinälinjalla, joka tulee huomioida mm. seinän nurjahduksen osalta.



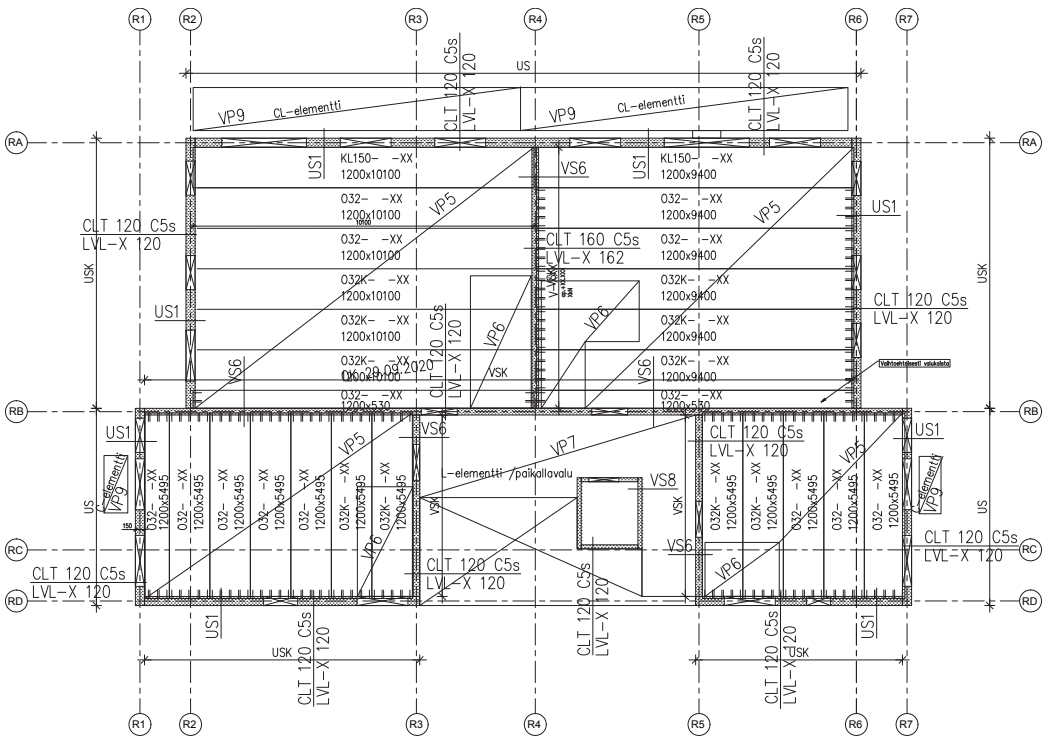
Kuva 25. Rakennevaihtoehto W/W toteutusratkaisu (Sweco, Hannes Tähtinen)



Kuva 26. Rakennevaihtoehto W/W 2 toteutusratkaisu.



Kuva 27. Rakennevaihtoehto C/C toteutusratkaisu.



Kuva 28. Rakennevaihtoehto W/C toteutusratkaisu.

## 3.3 Energiaratkaisut ja energiatehokkuus

Tässä kappaleessa tarkastellaan eri energiavaihtoehtojen sekä ostoenergian hiilijalanjälkeä tyyppikerrostalossa. Vertaileva energialaskenta- ja simulointi on tehty käyttämällä D.O.F Tech Oy:n ja Saint-Gobain Finland Oy:n Laskentapalvelua sekä Equa Simulation AB:n IDA Indoor Climate and Energy (IDA ICE) simulointiohjelmistoa. Laskennan tavoitteena oli selvittää erilaisten toimenpiteiden ja suunnitteluratkaisujen vaikutus rakennuksen kustannuksiin, energiankulutukseen sekä hiilijalanjälkeen.

Jäljempänä kuvatut laskelmat ja skenaariot perustuvat talotekniikan insinööriopiskelija Konsta Karhapään tekemään harjoitustyöhön sekä raporttiin, jonka toimeksiantajana ja tarkastajana on toiminut Kohti vähähiilistä rakentamista – Joensuu Wood City -projekti. Tässä oppaassa on otteita kyseisestä laaditusta raportista. Voit tutustua raporttiin kokonaisuudessaan osoitteessa: [www.karelia.fi/puurakentaminen/tutkimus](http://www.karelia.fi/puurakentaminen/tutkimus).

Energialaskennan sekä simulointien vertailukelpoisuuden varmistamiseksi, niissä on käytetty vuoden 2012 säätietoja. Säilyvyhykkeenä on käytetty vyöhyke 1. (Helsinki-Vantaa) kaikkien vaihtoehtojen osalta ja IDA ICE-simuloinnissa käytössä on ollut säilyvyhyke 3. (Jyväskylä). Sijaintipaikkakunta vaikuttaa osaltaan tehontarpeen laskentaan sekä todellisen ostoenergian suuruuteen.

Suurimpana erona eri rakennusten toteutustapojen sekä vaihtoehtojen välillä oli ulkoseinän, ylä- ja alapohjan sekä ikkunoiden lämmöneristävyydet. Myös rakennuksen ilmanvuotolukua parannettiin siirryttäessä matalaenergisempään toteutusvaihtoehtoon. IV-koneen vuosihyötysuhdetta parannettiin myös vastaamaan kunkin rakennustyyppin energiamääräyksiä. Passiivikerrostalossa jouduttiin myös eristämään lämpimän käyttövedenkierto asetettuun E-lukuun pääsemiseksi: eristeeksi valittiin 0,5 D, joka tarkoittaa eristepaksuutena 50 % putken halkaisijasta. Lisäksi kaikissa skenaarioissa lämpimän käyttövedenkierto kulki suojaputkessa.

Kohteen lämmöneristävyydet erosivat toisistaan eri rakennustyyppien välillä. Alla olevassa taulukossa (Kuva 29) on esitetty neljän eri rakennustyyppin U-arvot, joiden pohjalta laskennat on tehty. Minimiasetusten mukainen vaihtoehto on kuvattu vaihtoehto nollana, koska jälkimmäisissä laskelmissa se on jätetty tarkasteluiden ulkopuolelle. Rakenteiden U-arvo laskuissa käytettiin SFS-EN ISO 6946 mukaista laskentamenetelmää. Kaikissa vertailuissa ajateltiin ulkopuolen tuuletusraon olevan hyvin tuulettuva. Korjaustasot vaihtelivat rakenteittain. Korjaustaso kuvaa rakenteessa ilmaantuvia ilmarakoja, jotka saattavat heikentää eristystä. Ikkunoiden U-arvot on esitetty kuvassa 30.

Rakennustyyppi	U-arvo, Ulkoseinä (W/m <sup>2</sup> K)	U-arvo, Yläpohja ulkoilmaa vasten (W/m <sup>2</sup> K)	U-arvo, Alapohja ulkoilmaa vasten (W/m <sup>2</sup> K)	U-arvo, Alapohja maata vasten (W/m <sup>2</sup> K)
Minimiasetus Vaihtoehto 0	0,17	0,09	0,09	0,16
Kohteen lähtötiedot Vaihtoehto 1	0,12	0,08	-	0,16
Matalaenergia Vaihtoehto 2	0,12	0,08	0,08	0,12
Passiivi Vaihtoehto 3	0,10 (käytetty 0,08)	0,07	0,08	0,10

Kuva 29. Kohteen eri rakennustyyppien lämmönjohtavuudet.

Rakennustyyppi	U-arvo (W/m <sup>2</sup> K)
Asetuksen minimiarvot	1,00
Kohteen lähtötiedot	0,909
Matalaenergia	0,8
Passiivi	0,7

Kuva 30. Eri rakennustyyppien ikkunoiden U-arvot.

### 3.3.1 Lämmitys- ja jäähdytysjärjestelmät

Laskentapalvelun energialaskurin ja IDA ICE:n simulaation lämmitysmuotona käytettiin kaukolämpöä tilojen lämmitykseen ja lämpimän käyttöveden valmistukseen. Sähköä käytettiin ilmanvaihdon lämmityspatterin lämmitykseen sekä IV:n ja lämpimän käyttöveden valmistuksen apulaitteille. IDA:n simulaatiossa myös märkätilojen lattialämmitys sekä jäähdytys hoidettiin sähköllä.

Lämmönjako hoidettiin molemmissa ohjelmissa ilmanvaihtolämmityksenä, jotta tulokset olisivat vertailukelpoisia toistensa kanssa. IDA ICE:n oletuksena käyttämät ideaali lämmittimet ja jäähdyttimet toimivat tarkoituksenmukaisesti rakennuksen lämmitys- sekä jäähdytystarpeen selvittämiseksi.

### 3.3.2 Ilmanvaihto

Rakennuksessa käytettiin LTO:lla varustettua koneellista tulo- ja poistoilmanvaihtokonetta. LTO:n vuosihyötysuhde vaihteli rakennuksen tyyppin mukaan. Myös ilmanvuotolukua muutettiin rakennustyyppille ominaisiin arvoihin (Kuva 31). Tuloilman lämpötilan asetusarvona käytettiin IDA ICE:n oletusarvoa +16 °C. Ilman lämpötilan nousu asetettiin myös IDA ICE:n arvoon +1 °C. LTO:n lämpötilasuhteen määritettiin olevan kaikissa laskelmissa 60 %.



	LTO:n Vuosihyötysuhde	Ilmanvuotoluku $q_{50}$
Minimiasetus	55 %	4.0 ( $n_{50} = 3.27$ )
Kohteen lähtötiedot	55 %	2.0 ( $n_{50} = 1.64$ )
Matalaenergia	75 %	1.0 ( $n_{50} = 0.82$ )
Passiivi	80 %	0.73 ( $n_{50} = 0.6$ )

Kuva 31. Ilman- ja vuotoilmanvaihdon tunnusluvut.

Rakennuksen ilmanvaihdon muita tietoja, eriteltyinä laskentapalvelun laskurin ja IDA ICE -simulointiohjelman laskemiin arvoihin alla olevassa taulukossa. Tulo- ja poistoilmavirran suhde on yleensä noin 0,90–0,95, jolloin rakennus on lievästi alipaineinen. Liiallinen paineero voi olla kuitenkin haitaksi rakennukselle. Suhdetta käytetään tehontarpeiden sekä todenmukaisen ostoenergian laskennassa. Dynaamiset laskumenetelmät ottavat huomioon paine-eron E-lukulaskelmassa, mutta mm. laskentapalvelujen laskuri käyttää tulo- ja poistoilmanosuutena kerrointa 1,0.

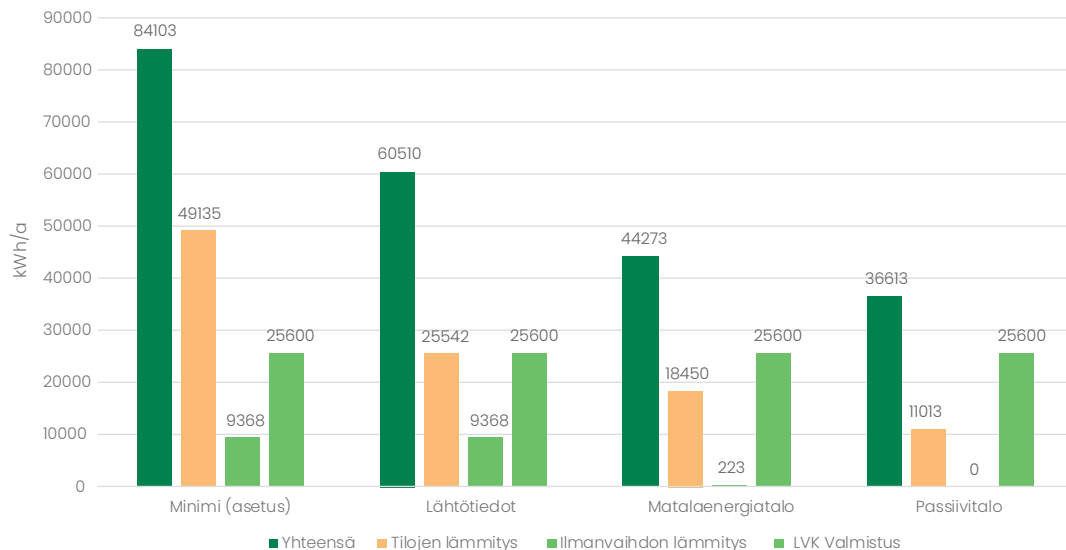
### 3.3.3 Energiavertailutulokset

Taulukossa (kuva 32.) on esitetty rakennusten E-luvut laskentapalvelut.fi mukaisesti. E-luvun raja-arvona käyttö-tarkoituluokan 2 rakennuksissa on 90 kWh<sub>e</sub>/ (m<sup>2</sup> a). Lähtötietoihin perustuva rakennus ei täyttänyt määräyksien asettamaa E-luvun raja-arvoa.

Tyyppi	$Q_{\text{kaukolämpö}}$ kWh/a	$Q_{\text{sähkö}}$ kWh/a	$F_{\text{kaukolämpö}}$	$F_{\text{sähkö}}$	E-luku (kWh <sub>e</sub> / (m <sup>2</sup> a))
Lähtötiedot	73917	47155	0,5	1,2	108,71
Matalaenergia	67412	36434	0,5	1,2	89,98
Passiivi	49737	33052	0,5	1,2	74,99

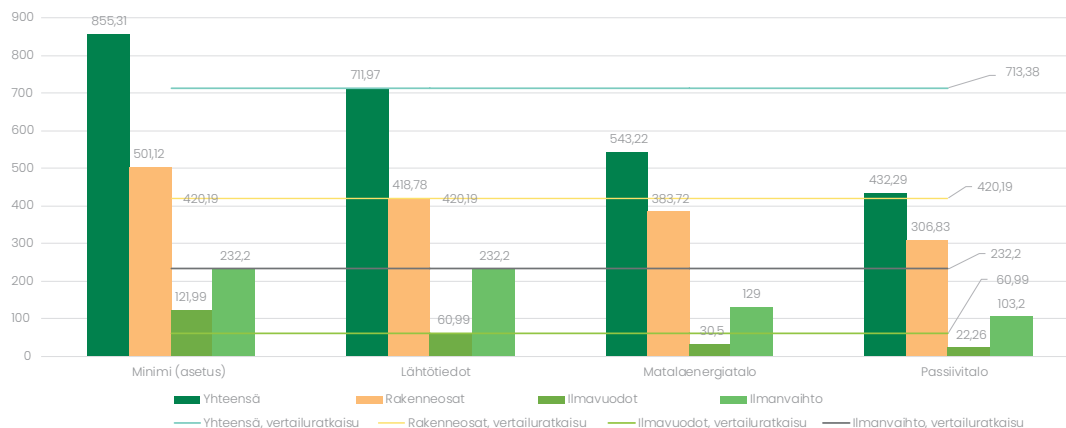
Kuva 32. Rakennustyyppien E-luvut laskentapalvelut.fi mukaan.

Kaaviossa energian nettotarpeista (kuva 33.) on esitetty näiden neljän rakennustyyppin vuotuiset energian tarpeet. Lämpimän käyttöveden osuus pysyi kaikissa samana, koska käyttöaste oli määritetty vakioksi. Käyttöveden kulutukselle ei pystynyt laskurissa antamaan itse arvoa, vaan laskuri päätteli arvon syötetyistä tiedoista. Kohteelle laskuri määrittä veden kulutuksen lattianeliöiden suhteen vuodessa 510 dm<sup>3</sup>/ (m<sup>2</sup> a). Motivan mukaan asuinkerrostalojen keskimääräinen vedenkulutus olisi 600 dm<sup>3</sup>/ (m<sup>2</sup> a), tai asukasperustaisesti laskien noin 150–155 dm<sup>3</sup>/hlö/vuorokausi. Kohteen käyttövesiverkosto ajateltiin olevan varustettu vakio paineventtiilillä, jonka takia laskurikin antoi veden kulutukselle arvon 510 l/ (m<sup>2</sup> a), joka on 15 % pienempi kuin vertailuarvo. Vertailun vuoksi myöhemmissä IDA ICE -simulaatioissa käytettiin samaa 510 dm<sup>3</sup>/ (m<sup>2</sup> a) arvoa keskimääräiselle vedenkulutukselle.



Kuva 33. Energian nettotarve eri rakennusluokissa (laskentapalvelut.fi).

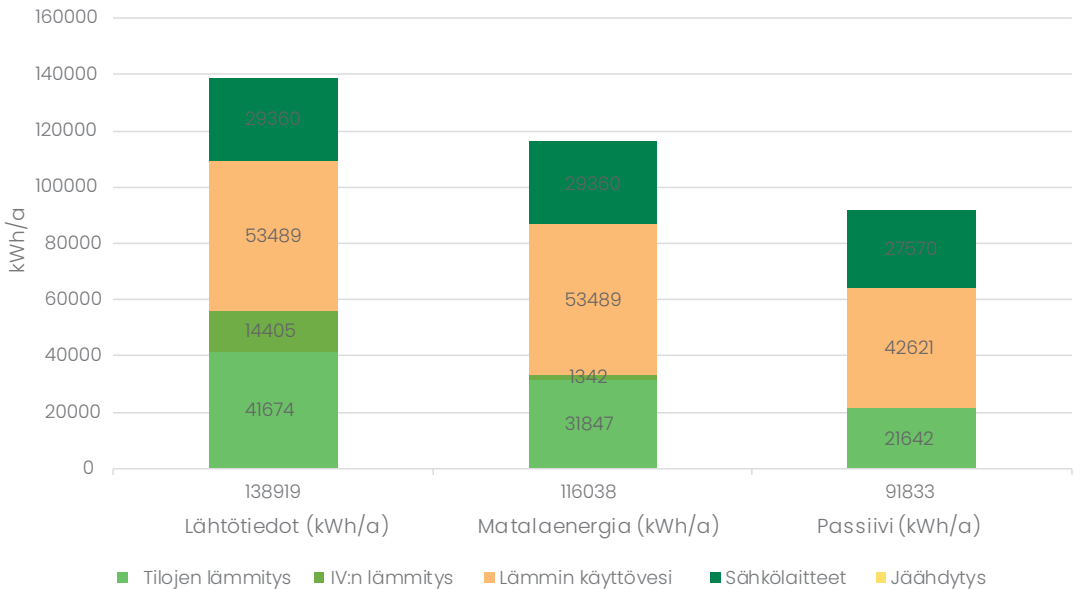
Ilmanvaihdon lämmityspatterin energiankulutus putoaa lähes noltaan jo matalaenergiallisessa rakennuksessa. Täysin noltaan päästään passiiviratkaisussa. Lämpimän käyttöveden jakelu- ja kierron häviöt korostuvat matalaenergia- sekä passiivi ratkaisussa. Jäähdytystehoja ei sisällytetty laskentapalvelun vertailutuloksiin.



Kuva 34. Rakennustyyppien ominaislämpöhäviöt, jossa vaakaviivat kuvaavat rakennuksen vertailuratkaisua.

Yllä olevasta kaaviosta (Kuva 34) havaitaan, että asetusten mukaiset minimiarvot eivät yllä vaadittujen ominaislämpöhäviöiden tasalle. Ilmanvaihdon lämpöhäviöiden vaatimus kuitenkin täyttyy, koska ilmanvaihdon vuosihyötysuhde on sallitulla tasolla (55 %). Rakennuksen vuotoilmahäviöiden laskennassa on käytetty suunnitteluarvona asetusten osoittamaa 4,0 m<sup>3</sup>/ (h m<sup>2</sup>). Arvoa on käytettävä, jos ilmanpitävyyden suunnitteluarvon toteutumista ei osoiteta mittaamalla (Ympäristöministeriö 2017).

Parhaiten säästöjä kuvaa todellista ostoenergian kulutusta kuvaava pylväskaavio (Kuva 35.). Kohteen lähtökohtaisten suunnitteluarvoihin pohjautuva puukerrostalo kuluttaisi n. 139 MWh energiaa vuodessa, josta IV:n ja tilojen lämmitykseen kuluisi n. 40 % (56,0 MWh/a) energiasta, lämpimän käyttöveden valmistukseen n. 38,5 % (53,5 MWh/a) energiasta ja loput n. 21,5 % (29,4 MWh/a) sähkölaitteisiin.



Kuva 35. Todellisen ostoenergian kulutus eri rakennustyypeissä (Laskentapalvelut.fi).

Vastaavasti matalaenergisessä ratkaisussa todellista ostoenergiaa kuluisi n. 116 MWh/a, eli noin 23 MWh/a vähemmän kuin lähtötilanteen rakennuksessa. Matalaenergisessä puukerrostalossa IV:n ja tilojen lämmitykseen kuluvan energian osa tippui n. 28,6 %:iin. Lämpimän käyttöveden valmistukseen kuluvan energian osuus kasvoi, ja sähkölaitteiden osuus kasvoi hieman, joskin sähkölaitteiden energiankulutus pysyi samalla tasolla (Kuva 36).

	Vertailuratkaisu (lähtötiedot)	Matalaenergia	Passiivi
Todellinen ostoenergia	139 MWh/a	116 MWh/a -23 MWh/a (-16,5 %)	92 MWh/a -47 MWh/a (-33,8 %)
Energian nettotarve	60,5 MWh/a	44,3 MWh/a -16,2 MWh/a (-26,8 %)	36,6 MWh/a -23,9 MWh/a (39,5 %)
Ominaislämpöhäviöt (yhteensä)	711,97 W/K	543,22 W/K -168,75 W/K (-23,7 %)	432,29 W/K -279,68 W/K (-39,3 %)

Kuva 36. Energian tunnusluvut verrattuna kohteen lähtötietoihin. Ensimmäisellä rivillä absoluuttinen luku, toisella erotus verrattuna lähtötietoihin ja kolmannella rivillä prosentuaalinen ero.

E-luku on IDA ICE -ohjelman laskelman mukaan hieman huonompi kuin laskentapalvelun vastaavan laskelman (Kuva 37). Molemmissa laskelmissa rakennuksen E-luokka oli kuitenkin sama (C). IDA :n mallissa mukaan laskettiin myös jäähdytys, mikä nosti E-lukua hieman. IDA :n simulaatiossa sähköä kulutettiin vähemmän suhteessa kaukolämpöön, mutta kuitenkin hieman enemmän kuin laskentapalvelujen vertailulaskelmassa. Kaukolämpöä IDA ICE:n malli kulutti huomattavasti enemmän.

Kohteen lähtötiedot		
	IDA ICE	LASKENTAPALVELUT
E-luku	113,2 (114)	108,71 (109)
Ominaislämpöhäviöt		
Sähkö	51 532 kWh/a	47 155 kWh/a
Kaukolämpö	110 558 kWh/a	73 917 kWh/a
Ostoenergia		
Ostoenergia yhteensä	162 107 kWh/a	138 919 kWh/a
- Lämmitys	38 060 kWh/a	41 674 kWh/a
- Lämmitys (IV)	14 714 kWh/a	14 405 kWh/a
- Jäähdytys	3 071 kWh/a	-
- LKV	60 978 kWh/a	53 489 kWh/a
- Sähkölaitteet	24 207 kWh/a	29 360 kWh/a
- Valaistus	9 022 kWh/a	-

Kuva 37. Vertailu lähtötiedoilla IDA ICE ja laskentapalvelut.fi

Esitetyissä hiilijalanjäljen vertailuissa onkin käytetty Joensuu Wood City- konseptin osalta kaikille runkoratkaisuvaihtoehdoille lähtötietojen mukaisia IDA ICE energiasimuloinnin arvoja eli ostoenergia: sähkö 51 532 kW<sub>h</sub>/A ja kaukolämmölle 110 558 kW<sub>h</sub>/A. Energiankulutuksen skenaarioiden vaikutukset hiilijalanjälkeen on esitetty tarkemmin kohdassa 3.2.4 Hiilijalanjäljen vertailu.

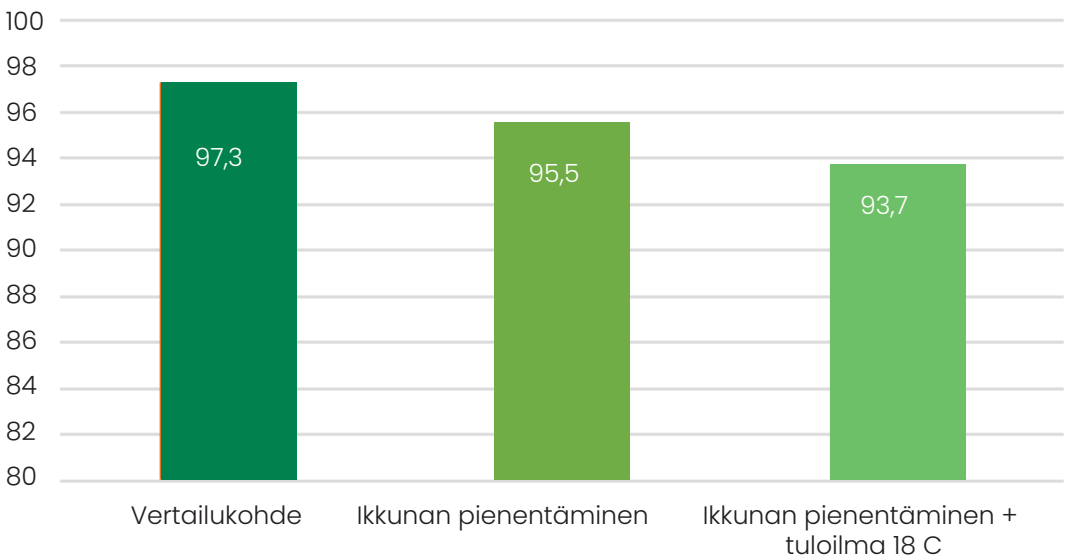
### 3.3.4 Energiatohokkuussuunnittelun toimenpiteet

Matalaenergisien ratkaisujen pohjalta tehtiin vielä muutama erillinen simulointi, joissa selvitettiin yksittäisten eri ratkaisujen vaikutusta lopputulokseen. Ensimmäisenä kokeiltiin pienentää ikkunapinta-alaa nostamalla ikkunoita lattian tasosta korkoon 0,30 m lattiatasosta. Samalla ikkunan korkeutta vähennettiin vastaavasti 0,30 m. Pienempiä ikkunoita, jotka eivät olleet lattia-tasossa, ei muutettu. Ikkunapinta-ala pieneni kokonaisuudessaan  $1 - (205,95 \text{ m}^2) / (236,89 \text{ m}^2) = 13,06 \%$ .

Uudeksi E-luvuksi tuli 95,5 mikä on E = 1,7 pienempi kuin vertailuratkaisussa. Vastaavasti ostoenergian kulutus pienentyi n. 2700 kWh/a. Sähkönosuus kulutuksen putoamisesta oli vain 530 kWh/a (19,6 %) ja kaukolämmön osuus loput 2170 kWh/a (80,4 %). Kaukolämmön osuudesta n. 430 kWh/a säästy jähdytyksen osuudessa, mikä on merkittävän suuri ottaen huomioon, että jähdytyksen kokonaisenergian kulutus on pieni verrattuna koko rakennuksen energiankulutukseen (yht. noin 4,5 – 5 kWh/a, noin 3,6 %:a).

Simulaatio jatkettiin edellisten tulosten pohjalta, eli ikkunapinta-ala oli pienennetty. Ilmanvaihtokoneen tuloilman lämpötilaa nostettiin 18 °C:een, mikä on 2 °C korkeampi kuin vertailutuloksissa.

Sisälämpötilat nousivat hieman rakennuksessa, ja jähdytyksen tehontarve nousi hieman isommaksi kuin edellisessä simulaatiossa, kuitenkin pysyen pienempänä kuin isomilla ikkunoilla. E-luku pieneni edellisestä arvoon E = 93,7 (Kuva 38.). Ostoenergian kulutus pieneni n. 6300 kWh/a, josta n. 11% kiinteistösähköä.



Kuva 38. E-luvut 2. simulointikierroksen vertailusta.

Laskentakohteen alustavissa suunnitelmissa todettiin, että rakennus soveltuisi rakenteiltaan matalaenergiakerrostaloksi. Kuitenkin lähtötietojen perusteella rakennus olisi saamassa C-energiatohokkuusluokaksi. Pelkillä rakenteiden muutoksella ei tavanomainen kerrostalo muutu matalaenergiataloksi. Luokitukseen B on kuitenkin suhteellisen helppo päästä mm. eristämällä lämpimän käyttöveden kierto, sijoittamalla paremman vuosihyötysuhteen omaavaan ilmastointikoneeseen, investoimalla parempiin ikkunoihin tai suojaamalla ikkunoita auringolta ja kiinnittämällä huomiota rakennuksen tiiveyteen rakennusvaiheessa.

Omavaraisella sähkö- tai lämpöenergialla E-lukua pystyisi parantamaan, joskin investoinnin kannattavuus pitäisi tarkastaa. Rakennuksen sähkökäyttöä pienentämällä vaikutetaan eniten sen E-lukuun. Tällä hetkellä sähkön energiamuotokerroin on kuitenkin aivan liian jyrkkä, varsinkin jos rakennuksessa suunniteltaisiin käytettävän vain ns. nollahiilisähköä, joka on tuotettu osittain tai kokonaan uusiutuvista energianlähteistä. Sähkön käyttöön pystyttäisiin vaikuttamaan mm. valitsemalla märkätiloihin vesikiertoisen lattialämmityksen sähköisen sijaan, jonka lämmitykseen käytettäisiin kaukolämpöä tai vaihtoehtoisesti omavaraista energiaa, mm. maalämpö.

Rakennuksen suunnitteluvaiheessa olisi jo hyvä kiinnittää huomiota ikkunapinta-alan määrään, ikkunoiden suuntaamiseen ja aurinkosuojausvaihtoehtoihin. Laskentakohteen jäähdytystarve oli pieni rakennuksen kokonaisenergian kulutukseen nähden. Ikkunoiden pienentämisellä huomattiin olevan vähentävä vaikutus sekä jäähdytys- että lämmityskuluihin. Ikkunapinta-alan pienentämisellä ja auringolta suojaamisella voitaisiin välttyä jäähdytyskuluilta kokonaan, eikä jäähdytysjärjestelmään tarvitsisi investoida. Ilmaston lämpenemistä ja tulevaisuutta ajatellen on kuitenkin hyvä pitää jäähdytysmahdollisuus mielessä.

## 3.4 Hiilijalanjäljen vertailu (GWP)

CA-arviointi suoritettiin käyttämällä One Click LCA-ohjelmaa. Tulokset on koottu alla oleviin taulukoihin sekä kuvaajiin. Tulokset kuvaavat elinkaaren aikaisia vaikutuksia EU Level(s) arviointimenetelmän mukaisesti 60 vuoden tarkasteluajanjaksolla sekä Ympäristöministeriön arviointimenetelmän mukaisesti 50 vuoden käyttöiällä.

Arviointitulokset perustuvat kohteesta koottuihin lähtötietoihin sekä suunnitteluvaiheen suunnittelu- asiakirjoihin. Tällöin saatuja tuloksia tulisi käyttövaiheen osalta tarkentaa, joko toteumatietojen tai erillisten mittaustietojen osalta koskien energiankulutusta sekä vedenkulutusta.

Materiaalien ja tuotteiden keskimääräiset huolto- ja kunnossapito sekä tuotteiden vaihtovälit perustuvat One Click LCA tietokannan tietoihin. Suositeltavaa on käyttää "RT 18-10922, Kiinteistön tekniset käyttöiät ja kunnossapitajakso" ohjeen tietoja.

Materiaalimenekkien ja hukkien osalta arvioina on käytetty One Click LCA tietoja. Suosituksena olisi kuitenkin käyttää "Ratu S-1191, Rakennustyön materiaalisat ja -hukat" ja "Rakennustöiden menekit 2020" ja "RATU KI-6035".

Käyttämällä OneClick LCA ohjelman omia tietoja vältetään tutkielman vääristyminen sen tekijän omien näkemysten tai asenteiden vaikutuksen johdosta. Sisällytetyt tiedot ovat listattuina alla ja on suositeltavaa, että kyseiset tiedot ilmoitettaisiin aina raportoinnin yhteydessä. Arviointiin ulkopuolelle jätettävät rakennusmateriaalit saavat kattaa alle 1 % rakennuksen kokonaismassasta tai energian kulutuksesta, mutta tarkastelun ulkopuolelle jätetyt materiaalit kokonaisuudessaan eivät saa silti ylittää 5% rakennuksen kokonais-

energian kulutuksesta tai massasta (EN15804/EN 15978). Materiaalien rajausta ei saa kuitenkaan käyttää tulosten salailuun tai peittämiseen.

Arvioituna vaikutuskategoriana on käytetty ilmaston lämpenemispotentiaalia GWPI00 (GWP- Global Warming Potential, kasvihuonekaasun aiheuttama ilmastonlämpenemisvaikutus hiilidioksidiin verrattuna 100 vuoden tarkasteluajanjaksolla). Alapuolella olevassa taulukoissa (Kuvat 39–40.) on kuvattu arvioinnin tekemisessä huomioidut elinkaaren vaiheet EN 15804:2012 mukaisesti.

Tuotevaihe			Rakentaminen		Käyttövaihe							Elinkaaren loppu				Hyödyt tai haitat
A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4	D
	x		x	x				x	x	x				X		X

Kuva 39. Arvioinnissa huomioidut elinkaaren vaiheet (x).

Elinkaariarvioinnin tekemisessä hyödynnettiin One Click LCA LCA EN-15978 työkalua. Työkalu tukee CML- metodologiaa ja kaikkia arvioituja vaikutuskategorioita. Kaikki aineistot työkalussa ovat yhteneviä EN 15804 standardin kanssa.

Ympäristöselostetietokantoina sekä ympäristöselosteiden hakuehtona pyritään käyttämään tuotteita sekä materiaaleja, jotka vastaavat mahdollisimman hyvin niin teknisiltä ominaisuuksiltaan, maantieteelliseltä edustavuudeltaan kuin ajalliselta edullisuudeltaan suunnitteluasiakirjoissa mainittuja tuotteita. Jos tuotteille ei löydy tyydyttävää vastinetta tietokannoista käytetään sille geneerisiä oletusarvoja hiilijalanjäljen ja hiilikädenjäljen osalta.

LCA analyysi sisälsi seuraavat rakennusosat TALO2000-luokituksen mukaan:

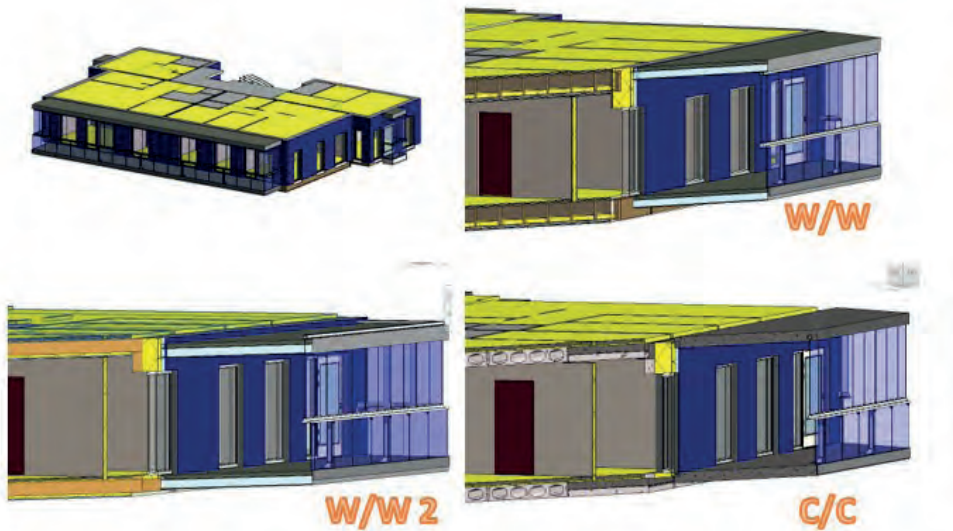
Rakennusosa	Sisältyy laskentaan	Kommentit
Perustukset	KYLLÄ	Sisällytetty kantava alapohjalaatta, mutta ei paaluanturoita ja paaluja.
Runko	KYLLÄ	
Välipohjat	KYLLÄ	
Katto	KYLLÄ	Ei sisällä ristikkorakenteita
Portaat	KYLLÄ	
Ulkoseinät	KYLLÄ	
Ikkunat ja ovet (ulko)	KYLLÄ	Ei sisällä erillisiä detaljiosia mm. kiinnitysosat
Sisäseinät ja väliseinät	KYLLÄ	
Ovet (sisä)	KYLLÄ	Ei sisällä erillisiä detaljiosia mm. kiinnitysosat
Pintakäsittelyt	EI	Ei sisällä esim. tapetteja tai maalattuja pintoja
Seinien pintakäsittelyt	EI	Rajattavissa pois rajaussäännön mukaisesti
Lattioiden pintakäsittelyt	EI	Rajattavissa pois rajaussäännön mukaisesti
Sisäkatot (sisältäen pintakäsittelyt)	KYLLÄ	Ei sisällä pintakäsittelyitä
Kosteussulut ja höyrynsulut	KYLLÄ	Määrät arvioitu
Rakennuslaitteet ja kalusteet		
Palokatkot/mansetit ja palokatkomassat	EI	
Kiintokalusteet ja laitteet	EI	
Palvelut		
Märkätilojen ja WC-tilojen kalusteet	EI	
Palvelu- ja huoltokalusteet	EI	
Jätehuolto	EI	
LVI-tekniikka, vesi	KYLLÄ	Käytetty keskimääräisiä OneClick LCA arvoja m2
LVI-tekniikka, lämmitys	KYLLÄ	Käytetty keskimääräisiä OneClick LCA arvoja m2
LVI-tekniikka, ilmanvaihto	KYLLÄ	Käytetty keskimääräisiä OneClick LCA arvoja m2
Sähköjärjestelmät	KYLLÄ	Käytetty keskimääräisiä OneClick LCA arvoja m2
Kaasujärjestelmät	EI	
Hissit	KYLLÄ	
IT-tekniikka, valvonta CCTV	EI	
IT-tekniikka, viestintä ja tietoverkot	EI	
Muut järjestelmät	EI	
Tontti	EI	
Piha-rakenteet, kaivut ja täytöt	KYLLÄ	AP-täytöt ja routaeristeet.
Viemäri ja sadevesijärjestelmät	EI	
Ulkorakennukset	EI	

Kuva 40. Arviointiin sisällytetyt rakennusosat.



### 3.4.1.1 Hiilijalanjäljen vertailu yksittäisen kerroksen osalta

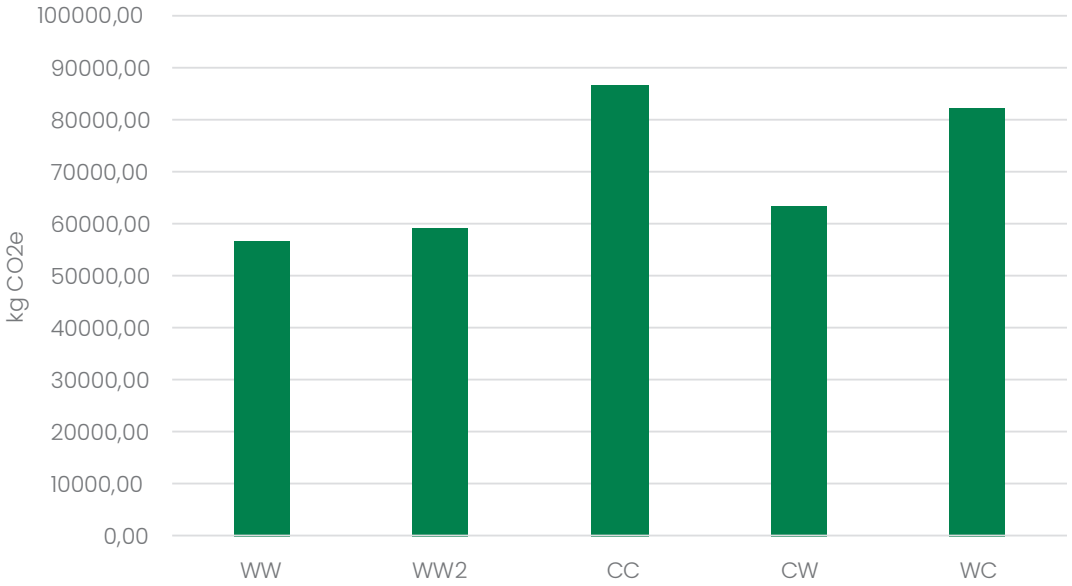
Aikaisemmin mainitun rakenneosakohtaisen arvioinnin jälkeen voidaan tarkastella rakennuksen hiilijalanjäljen optimointia yksittäisen kerroksen osalta. Hiilijalanjälkilaskijan sekä suunnittelijan on tässä vaiheessa tunnistettava hiilijalanjäljen kannalta merkittävimmät rakennusosat, joihin voidaan lukea runko, julkisivut, tilan jako-osat sekä tilapinnat. Yhden kerroksen tarkasteluun on otettu konseptikerrostalossa mukaan alla olevan kuvan mukaiset rakenteet (Kuva 41). Poikkeuksen tekee kuitenkin ulkotasojen rakenteet kuten parveke- laatat sekä parvekelasitukset, jotka jätettiin yhden kerroksen tarkastelun osalta pois.



Kuva 41. Tietomallista otetut havainnekuvat yhden kerroksen tarkastelun osalta.

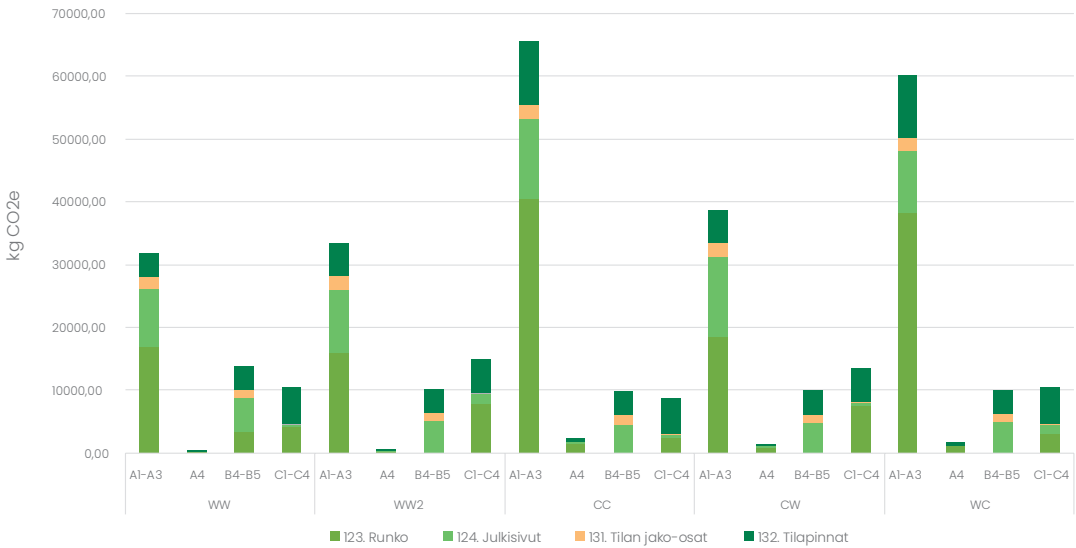
Hiilijalanjäljen tulosten tarkastelu on tehty käyttäen OneClick LCA omia hukan arvioita, käyttöikiä sekä elinkaaren lopun skenaarioita. Tarkastelu on tällöin toteutettu EU Level(s) menetelmän mukaisesti, jotta eri materiaalien vaikutukset niin hukkiin, huoltoihin kuin elinkaaren loppuun tulevat paremmin esille. Tuloksista voidaan huomata, että odotetusti vähähiilisintä ratkaisua edustaa A1-3 vaiheen osalta rankarunkoinen ripalaatalla toteutettu vaihtoehto W/W (Kuva 42). Suuripäästöisintä ratkaisua edustaa sen sijaan vaihtoehto C/C ollen kokonaishiilijalanjäljeltään yli 50 % suurempi W/W ratkaisuun nähden.

### Hiilijalanjälki kerrosta kohden rakennusmateriaalit (A-C)



Kuva 42. Rakennevaihtoehtojen kokonaishiilijalanjälki sisältäen A, B ja C rakennuksen elinkaarenvaiheet.

### GWP (EU LEVELS ja Talo 2000 luokitus)

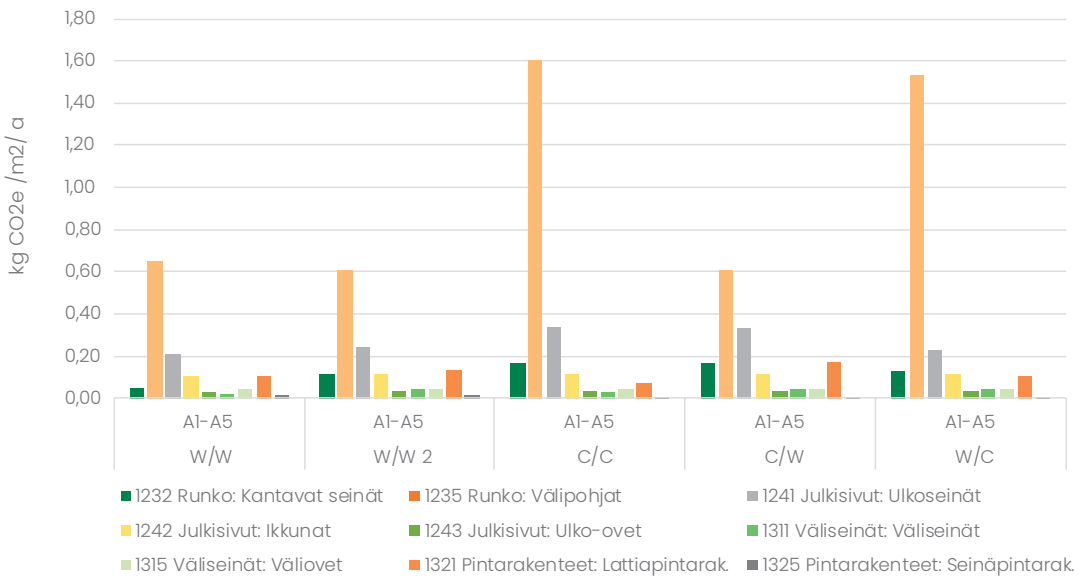


Kuva 43. Talo 2000 päälukituksen mukaiset hiilijalanjäljen arvot eri rakennevaihtoehdoille (kg CO<sub>2</sub>e).

Täysin puurakenteisten W/W ja W/W 2 vaihtoehtojen osalta keskinäiset erot eivät kuitenkaan ole merkittäviä. Suurimpana yksittäisenä tekijänä voidaan nähdä 123. Runko (Kuva 43.). Tärkeää hiilijalanjäljen kannalta on kuitenkin tarkastella laajemmin syitä siihen, miten konseptikerrostalon rakenteet muodostuvat ja mikä on toimenpiteiden laajempi vaikutus. Voimme myös tunnistaa, että 124. Julkisivut osalta kaikille rakennevaihtoehdoille yhteisiä rakenteita ovat ikkunat sekä ulko-ovet. Väliseinien osalta sen sijaan yhteisiä rakenteita ovat väliovet. Valitsemalla näiden tilalle vähäpäästöisempiä vaihtoehtoja saamme pudotettua samalla kaikkien vaihtoehtojen päästöarvoja.

Sama tilanne voidaan myös huomata 1321 Pintarakenteiden ja etenkin lattiapintarakenteiden osalta käytettäessä kelluvaa pintalaattaa (Kuva 44.). Hiilijalanjälkeä olisi saatu pienennettyä W/W 2, C/C, C/W sekä W/C vaihtoehdossa vaihtamalla kelluvan pintalaatan betonilaatu C25/30 betonilaatuun C20/25 tai käyttämällä pienemmän vesi- sementtisuhteen omaavaa maakostea betonია. Maakostean betonin käytöllä saataisiin pienennettyä työmaan kuivumisaikoja sekä työmaan päästöjä kuivatuksesta. W/W ripalaatalla sen sijaan käytössä on kaksinkertainen lattiakipsilevytys.

Merkittävin päästövähenys saadaan kuitenkin aikaan optimoimalla rakennuksen julkisivurakenteita sekä nimenomaan kantavan rungon osalta välipohjarakenteita. Välipohjarakenteiden osuus on kuitenkin riippuvainen rakennuksen muodosta sekä kerroskorkeudesta, joka voi muuttaa välipohjan, julkisivun sekä kantavien seinien keskinäistä sijoittumista.

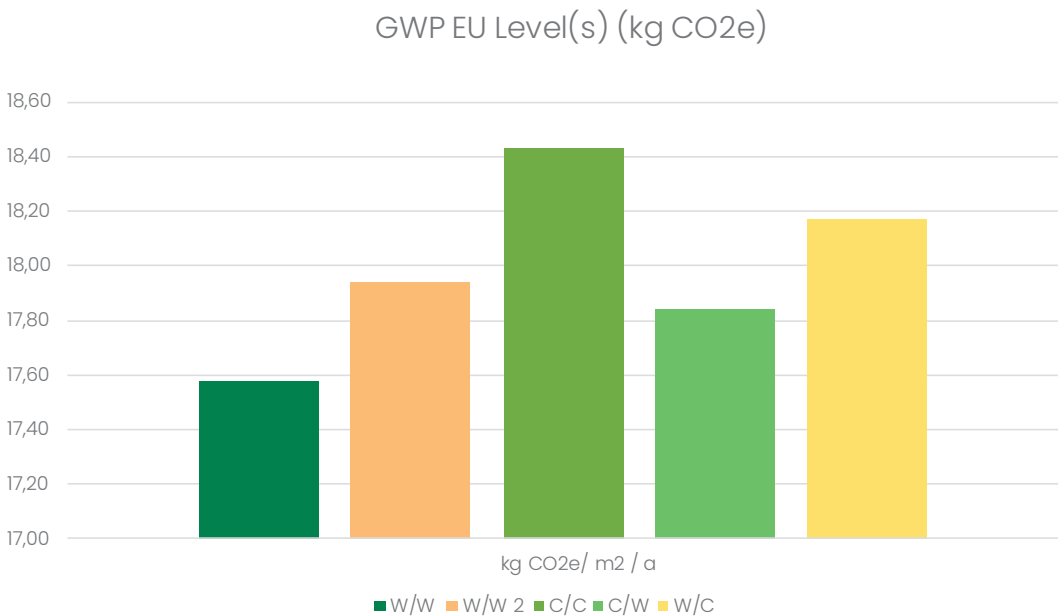


Kuva 44. Talo2000 tarkennettu rakennusosakohtainen tarkastelu (kg CO<sub>2</sub>e/m<sup>2</sup>/a)

### 3.4.1.2 Hiilijalanjäljen vertailu koko kerrostalon osalta

Tarkasteltaessa koko konseptikerrostalon tasolla muutoksia alkavat keskinäiset erot kuitenkin tasaantua, johtuen osaltaan ulkotasojen mukaan ottamisesta. Tässä kappaleessa tarkastelu suoritetaan EU Level(s) mukaisesti sekä esitetään EU Level(s) ja Ympäristöministeriön arviointimenetelmillä saatavia eroja sekä syitä niihin. Vertailuysikkönä käytetään tällöin tulosten yhdenmukaistamiseksi GWP- päästöjen neliökohtaista sekä vuosikohtaista arvoa ( $\text{kg CO}_2\text{e}/\text{m}^2/\text{a}$ ). Tarkasteluajanjakso on esitetty Ympäristöministeriön arviointimenetelmän osalta niin 60 vuodelle kuin 50 vuodellekin.

Rakennevaihtoehtojen keskinäiset tulokset säilyvät lähes yhtenäisenä yksittäisen kerroksen tarkasteluun nähden. W/W rakenneratkaisu on edelleen vähäpäästöisin, mutta C/W rakenneratkaisu on osoittautumassa teoreettisessa tarkastelussa jopa W/W 2 vaihtoehtoa vähäpäästöisemmäksi (Kuvat 45-46.). Syynä tähän voidaan nähdä osittain se, että C/W rakennevaihtoehdossa betoniseinät pystytään toteuttamaan pääosin raudoittamattomina. Myöskään erillistä levysuojausta tai eristekerroksia ei tarvita kantavan runkorakenteen täyttäessä nämä rakenteelliset vaatimukset sellaisenaan. Täysin betonirakenteisen kerrostalon päästöt, huomioiden rakennuksen käyttövaiheen B6 energiankulutus, ovat noin 5 % suuremmat kuin vähäpäästöisimmän W/W vaihtoehdon. A1-3 vaiheen osalta päästöt sen sijaan ovat noin 34 % suuremmat C/C osalta W/W verrattuna.



Kuva 45. Hiilijalanjäljen vertailuarvot rakennevaihtoehtojen osalta ( $\text{kg CO}_2\text{e}/\text{m}^2/\text{a}$ ).

## GWP EU Level(s) (kg CO<sub>2</sub>e)



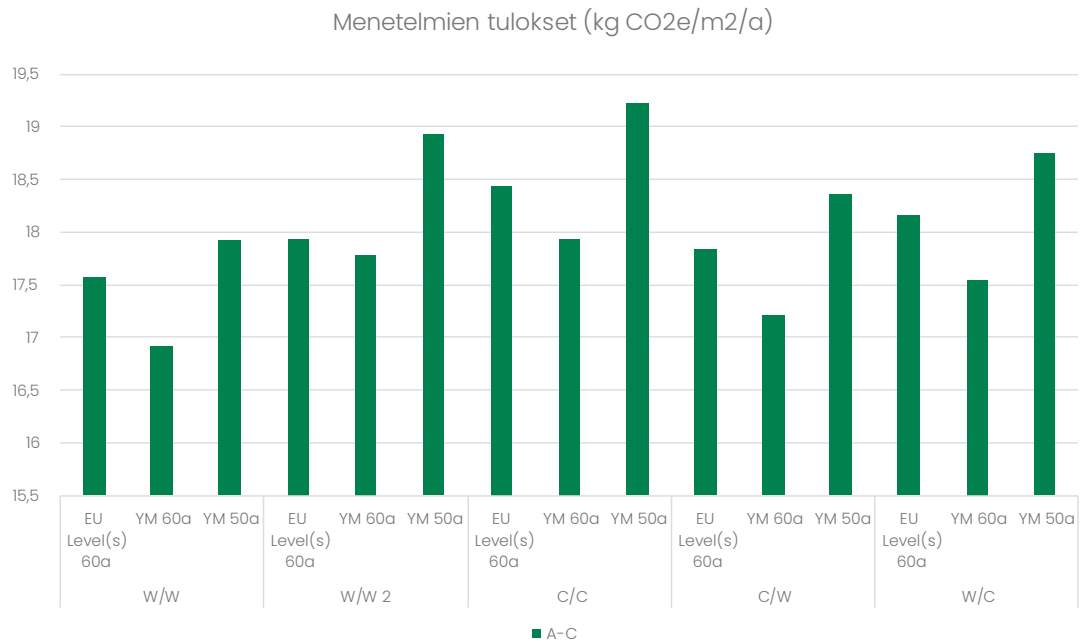
Kuva 46. Hiilijalanjäljen vertailuarvot rakennevaihtoehtojen osalta (kg CO<sub>2</sub>e) elinkaaren vaiheittain.

Vaakarakenteiden osalta on todettava, että ontelolaattaratkaisulla toteutettaessa ei kuormiteta niin paljon pitkän julkisivulinjan ylityspalkkeja tai peliä. Pääkantosuunta on välipohjan osalta pidemmän jännevälän suuntainen ja CLT:llä lyhyemmän pääkantosuunnan saamiseksi epäedullisempi pitkän julkisivun osalta. Toisaalta CLT välipohjarakenteen mm. omapainon osuuden pienempi osuus sekä kokonaiskuormitusten vähentyminen eivät aiheuta lisätoimenpiteitä verrattuna ontelolaattavälipohjaratkaisuun ylityspalkkien sekä pelien osalta.

Arvioitaessa tuloksia EU Level(s) sekä Ympäristöministeriön arviointimenetelmillä voidaan kuitenkin huomata neliö/vuotuisissa päästöarvoissa kuitenkin merkittäviä eroja 60 vuoden tarkastelujakson aikana, (Kuvat 46–47.). Suurimmat erot muodostuvat siitä, että Ympäristöministeriön arviointimenetelmässä käytetään mm. käyttövaiheen huollon sekä elinkaaren lopun arvioinnissa taulukkoarvoja, jotka eivät ota kantaa käytettävään rakennusosan materiaaliin. EU Level(s):n tarkennetun menetelmän mukaisessa arvioinnissa, voidaan käyttää esim. OneClick LCA ohjelman sisäänrakennettuja tietoja tai käyttäjän itsensä ilmoittamia tietoja. Samainen tilanne on myös materiaalien kuljetusetäisyyksien sekä työmaan skenaarioiden osalta. Tällöin YM:n arviointimenetelmä antaa korostettuja arvoja rakennusmateriaalien osalta, mutta reilusti pienempiä arvoja käyttövaiheen B6 vaiheen osalta.

Eroa käyttövaiheen B6 osalta selittää se, että EU Level(s) menetelmässä voidaan käyttää paikallisia todellisia päästöarvoja, jos niitä vain on saatavilla. Todellisissa päästöarvoissa ei ole yleensä ennakoituna odotettua päästöjen vähentymistä esim. kaukolämmön tuotantotavan muutosten johdosta. Ympäristöministeriön arviointimenetelmässä sen si-

jaan voidaan käyttää joko paikallista tietoa tai kansallista arvoa esim. kaukolämmön osalta. Kaukolämmön päästöjen vaikutus onkin merkittävä tarkasteltaessa B6 käyttövaiheen päästöjä, jolloin on jopa edullista arvioinnin lopputuloksen kannalta käyttää keskimääräisiä päästöarvoja. B6 vaiheen vaikutukset johtavatkin lopulta edulliseen vaikutukseen. Tällöin sen käyttö on kannattavaa, vaikka A1–5 päästöt lisääntyvät menetelmää käytettäessä. Onkin suositeltavaa toteuttaa hiilijalanjäljen arviointi niin paikallista kuin kansallista päästötietoa käyttäen.



Kuva 47. Arviointimenetelmien EU Level(s) sekä Ympäristöministeriön arviointimenetelmien tulokset.

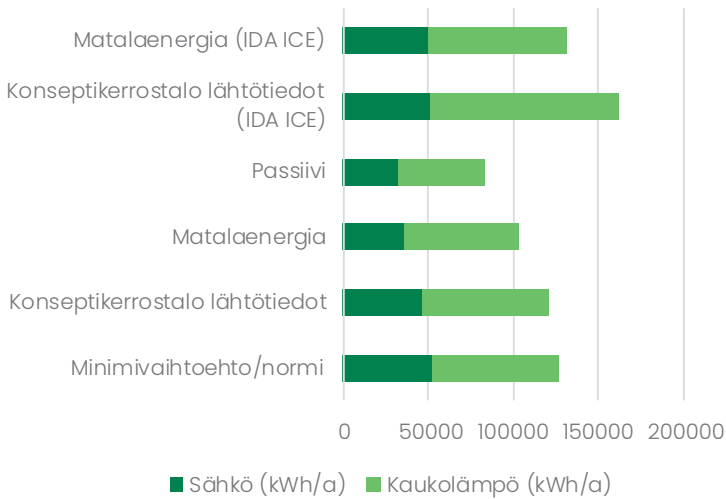


Kuva 48. Arviointimenetelmien EU Level(s) sekä Ympäristöministeriön arviointimenetelmien tulokset rakennuksen elinkaaren vaiheittain.

Konseptikerrostalon tulosten perusteella voidaan todeta, että vähähiiliseen ratkaisuun voidaan päästä myös käyttämällä betoni- sekä puurakenteiden hybridiratkaisuja. Avainasemassa onkin tunnistaa rakenteiden parhaat ominaisuudet sekä hyödyntää niitä jo suunnitteluvaiheessa. Vertailua ei tule toteuttaa rakennevaihtoehtojen välillä myöskään vaihtamalla suoraan materiaalien painoa tai tilavuuksia keskenään vaan vertailun tulee perustua mahdollisimman pitkälle yhdenvertaiseen materiaalivertailuun materiaaliominaisuuksien sekä vaatimusten osalta.

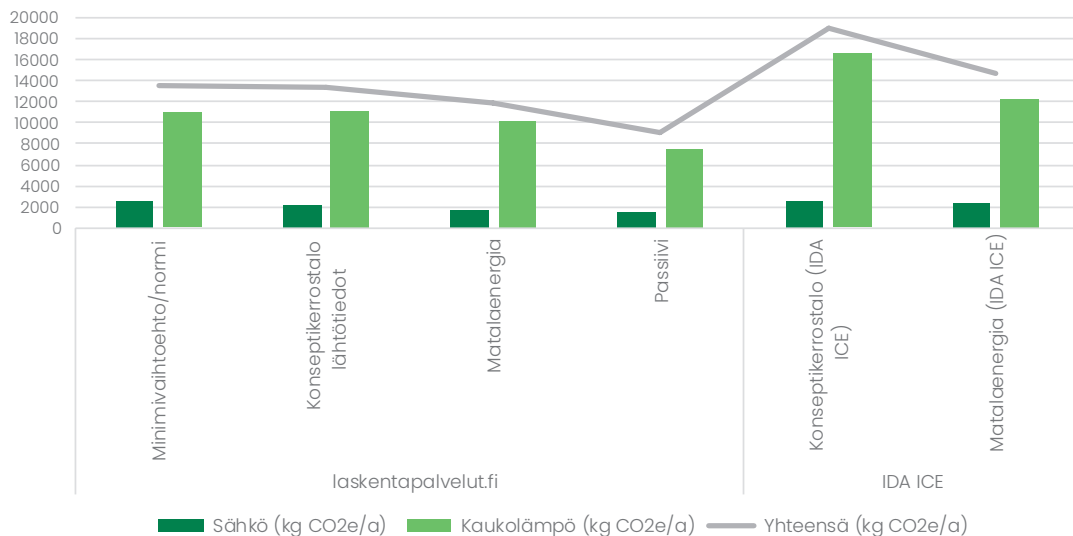
Tärkeimpänä toimenpiteenä niin konseptikerrostalon kuin yleisen rakennuskannan osalta voidaan ensi sijassa pitää energiantuotannon päästöjen pienentämistä tulevaisuuden skenaarion mukaisesti (Kuvat 50–51.). Seuraavaksi tärkeimpänä toimenpiteenä voidaan nähdä rakennusmateriaalien sekä rakennushankkeen hiilijalanjäljen pienentäminen niin suunnittelun kuin rakennusaikaisten toimenpiteiden avulla. Konseptikerrostalossa olisikin saavutettu lähtötilanteeseen nähden energiatehokkuustoimenpiteillä hiilijalanjäljen osalta noin 10 % vähennys matalaenergiaratkaisulla sekä 30 % vähennys passiivitasoisena (Kuva 49.). Materiaalien hiilijalanjäljen voidaan karkeasti tällöin lisääntyvän noin 10 % prosenttia eristysmateriaalien paksuuden kasvaessa. Jos kaukolämmön päästöt vähentyvät skenaarion mukaisesti on lähtötilanteeseen nähden tapahtuva päästövähennys merkittävä.

### Vakioidulla käytöllä laskettu ostoenergia



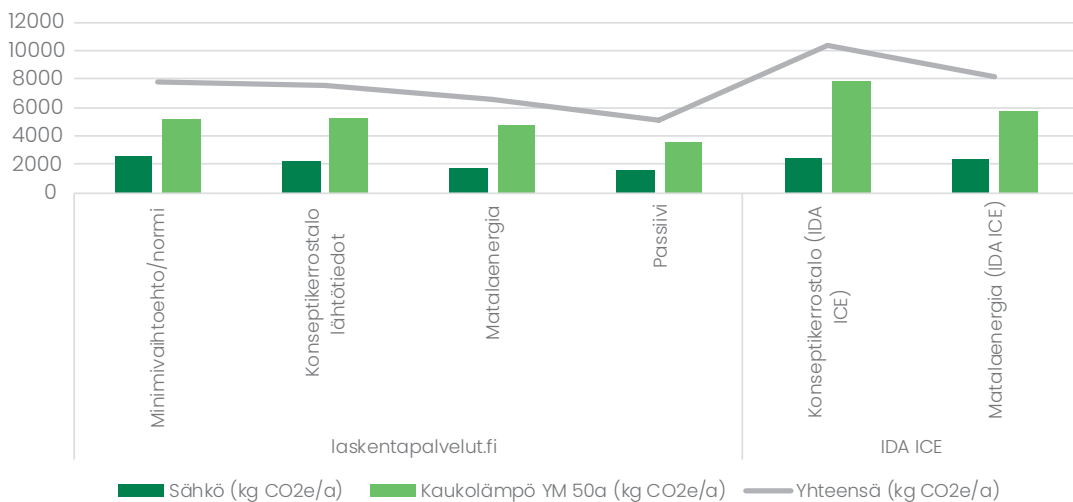
Kuva 49. Ostoenergian vuotuiset arvot (kWh/a) eri vaihtoehdoilla.

### Ostoenergian vuotuinen hiilijalanjälki (kaukolämmön päästöt eivät vähene tulevaisuudessa)



Kuva 50. Ostoenergian vuotuinen hiilijalanjälki, kun kaukolämmön päästöt eivät vähene tulevaisuudessa.

### Ostoenergian vuotuinen hiilijalanjälki (kaukolämmön päästöt vähenevät tulevaisuudessa YM)



Kuva 51. Ostoenergian vuotuinen hiilijalanjälki, kun kaukolämmön päästöt vähenevät tulevaisuudessa.



# 4 Käytännön työkaluja rakennusten hiilijalanjäljen optimoimiseksi

Tämän osion tavoitteena on antaa rakennuttajille ja suunnittelijoille käytännön työkaluja ja esimerkkejä, joiden avulla rakennuksen elinkaaren päästöjä voidaan pienentää. Suurin osa työkaluista on yleisesti käytössä olevia, mutta mukana on myös Karelia-ammattikorkeakoulun Kohti vähähiilistä rakentamista – Joensuu Wood City -projektissa kehitettyjä työkaluja. Jälkimmäisessä tapauksessa on kuitenkin huomioitava ne ovat vielä konseptitasolla.

Osio sisältää myös käytännön ohjeistusta rakennusten elinkaaren päästölaskentaan liittyen. Tällaista ohjeistusta on muun muassa se miten eri materiaalit rakennusosta tulisi merkata tietomalliin tai, miten eri rakennusosien päästötiedot voidaan merkata suunnitteludokumentteihin.

## 4.1 Rakentamisen ympäristöindikaattorit maankäyttösopimuksissa

**K**aavoitusratkaisut ja maankäytön suunnittelu on yksi tehokkaimmista tavoista vaikuttaa rakentamisen elinkaaren päästöihin. Tämän vuoksi kuntien kaavoitusosastoilla on suuri vastuu päästöjen pienentämisessä. Asemakaavojen lisäksi rakentamisen ympäristönäkökulmat voidaan huomioida esimerkiksi maankäyttösopimuksissa. Tähän tarpeeseen Karelia-ammattikorkeakoulun Kohti vähähiilistä rakentamista – Joensuu Wood City -projektissa tuotettiin selvitys, jonka tavoitteena oli antaa konkreettisia työkaluja ja menetelmiä rakentamisen elinkaari vaikutusten ja ekologisen kestävyuden mittareiden asettamiseen ja vertailuun maankäyttösopimusten yhteydessä.

Rakentamisen ympäristöindikaattorit maankäyttösopimuksissa -selvitystyö esittää selkeät ja käytännönläheiset kriteerit hyödynnettäväksi kestävyyslaadullisina kriteereinä maankäyttösopimuksissa ja kilpailumenettelyissä. Käytännössä tällä tarkoitetaan tilanetta, jossa kunta myy tontin uudisrakentamista varten sopimusmenettelyllä tai kilpailumenettelyllä, jossa osana laadullisia arviointikriteereitä on hyödynnetty rakentamisen elinkaarivaikutuksia ja muita ekologisen kestävyuden mittareita. Esitetyjä kriteereitä voi myös tarjottavan ratkaisun itsearviointiin kunnan näkökulmasta.

- Tontinluovutusvaiheessa asetettavat vaatimukset rakentajalle
- Tontinluovutusvaiheessa asetettavat laadulliset arviointikriteerit osaksi tontinluovutuskilpailua
- Rakentamiselle asetettavien tavoitteiden asettaminen osana tontinkäyttösopimusta
- Yksittäisen rakennushankkeen tavoitteiden asettaminen

Selvitys on ladattavissa kokonaisuudessaan alla olevasta linkistä:

<https://figbc.fi/julkaisu/opinnaytetyo-rakentamisen-ymparistoidikaattorit-tontinluovutuksessa-ja-rakennushankkeiden-kilpailutuksissa/>

## 4.2 Hiilijalanjäljen pienentämiskeinoja rakennuksen elinkaaren eri vaiheissa

Rakentamisen päästöohjaukseen siirryttäessä rakennuksen suunnittelijoiden tulisi huomioida rakennuksen elinkaari kokonaisuudessaan. Suunnittelija pystyy vaikuttamaan rakenteiden hiilijalanjälkeen valitsemalla rakenneratkaisuja, jotka mahdollistavat muuntojoustavuuden, tehokkaan tilankäytön, energiatehokkuuden sekä vähäiset materiaalimenekit. Rakennusmateriaalien osalta optimoimalla rakennusmassaltaan suurimpia kantavan rungon osuuksia saadaan tällä tehtyä suurimmat hiilijalanjäljen säästöt.

Jäljempänä mainitut toimenpiteet ovat vain osa monista vähennystoimenpiteistä, joilla voi saada kohteessa vähennettyä rakennuksen GWP (kgCO<sub>2</sub>e) kokonaismäärää suunnittelu- sekä työmaavaiheessa. Tärkeimpänä vähennystoimenpiteenä voidaan kuitenkin pitää vähähiilisen rakentamisen tavoitearvojen asettamista jo tarvesuunnitteluvaiheessa. Tällöin tavoitearvot voidaan ottaa jo osaksi tilaohjelman valmistelua sekä suunnittelu-työtä. Alkuvaiheen tavoitearvojen avulla voidaan estää myös osaltaan lisäkustannuksien syntyminen rakennusprojektin myöhemmissä vaiheissa sekä edistää rakenteiden optimointia elinkaaren päästöjen näkökulmasta.

## Hiilijalanjäljen pienentämiskeinoja rakennuksen elinkaaren eri vaiheissa

### A1-A3 Tuotteiden valmistus - GWP vähennystoimenpiteet

- Miettimällä onko rakennukselle tarvetta, onko olemassa olevia rakennuksia mahdollista hyödyntää, onko sijainti viisas myös tulevaisuutta ajatellen, ovatko tilat muunneltavissa myös tulevia käyttötarkoituksia tai oppilasmäärän lisäämistä ajatellen
- Vähentämällä fossiilipohjaisten eristeiden käyttöä esim. XPS ja SPF, huomioiden materiaalien käyttöiät sekä tarkoituksenmukainen käyttö ympäristöolosuhteiden näkökulmasta mm. routaeristeet
- Muuntojoustavuus sekä rakennuksen muodon optimointi: tilat voidaan sijoittaa järkevästi eikä muodostu ylimääräisiä käytäviä sekä yksinkertaistamalla rakennuksen muotoa
- Materiaalitehokkuus ja rakennusosien optimointi: onko rakenteet tehty ”yhdellä” muotilla vai onko rakenteiden paksuuksia sekä materiaalien käyttöä tehostettu vallitsevien kuormien mukaisesti
- Rakennusosien uudelleenkäyttö mm. purkukohteista huomioiden, että kierrätettyjen rakennusosien tulee täyttää rakenteelliset sekä visuaaliset vaatimukset.
- Kierrätysmateriaalien suosiminen esim. raudoitetun betonian käyttö, joka sisältää kierrätettyä materiaalia (ei ole neitseellistä) tai betonin käyttö jossa on käytetty kierrätettyjä sideaineita
- Piha-alueiden täyttömaina esim. purkukohteen betonimurske, jolla säästetään luonnollisia kivi- ja maa-ainesvaroja. Muistettava kuitenkin, että murskeen käyttö vaatii ympäristöluvan esim. lasten leikkipuistoissa.
- Vähintään 10 % materiaaleista uusiutuvia tai kierrätettyjä
- Käytetyt uusiutuvat ja kierrätetyt materiaalit raportoidaan, jolloin voidaan todentaa toimenpiteiden vaikutukset

### A4-A5 Rakentaminen - GWP vähennystoimenpiteet

- Käyttämällä kuljetuksia, joissa täyttöaste rekoilla olisi lähellä 100 % sekä yhdistelemällä kuljetuksia
- Työmaan aloituksen ajoittaminen sekä lämmitystä vaativien työvaiheiden ajoitus kesäkaudelle, jolla on vaikutusta mm. lämmityskustannuksiin sekä työmaan energiankulutukseen
- Työmaa-aikainen kosteudenhallinta sekä suojaus (kuivaketu10) on mahdollisuus vähentää kuivauksen sekä lämmityksen päästöjä.
- Rakennusaikaisen hukan vähentäminen tilaamalla rakennusmateriaalit ja tuotteet mm. kipsilevyt oikean mittaisena
- Työmaan energiankulutus mitataan sekä arvioidaan mahdolliset parannustoimenpiteet jo työmaavaiheen aikana
- Työntekijöiden energiakoulutus: vaikutus rakennustyön laatuun mm. rakennuksen tiiveyteen
- Seuraamalla syntyvää työmaajätteen määrää sekä lajittelemalla se asianmukaisesti: mahdollistaa hukan vähentämisen vaikutuksien arvioinnin tulevissa kohteissa

## **B1-B5 Käyttövaihe - GWP vähennystoimenpiteet**

- Valitsemalla materiaaleja ja tuotteita, joilla on hyvä kulutuksenkestävyys, tekninen käyttöikä sekä pitkä takuu-aika
- Ajoittamalla huollot oikea-aikaisesti (ajatuksella tehty huoltokirja) sekä toteuttamalla suunnitellut huolto- ja kunnossapitotoimenpiteet oikeassa laajuudessa ja oikeaan aikaan.

## **B6 Energian kulutus - GWP vähennystoimenpiteet**

- Lämmöneristyksen lisääminen ja rakenteiden U-arvon parannukset nykyiseen RAKMK-vaatimustasoon verrattuna. 10-20 % määräyksiä parempi energiatehokkuus: lisää elinkaarivaiheiden A1 ja A3 päästöjä, joten vaikutukset tulee arvioida kokonaisuutena
- Tiiveyden parantaminen rakenteissa ja kylmäsiltojen välttäminen (esim. kaikki ikkunat eivät ole lattiatasoon asti)
- Ikkunoiden ja ovien valinta painottamalla U-arvoa. Varustelun miettiminen mm. sälekaihtimet, jotka olisivat viisainta olla seisokkiaikoina kesäkausina kiinni
- Valitsemalla ikkunoiden ja suurien lasijulkisivujen sijainnit sekä koot ilmansuuntien mukaan
- Valitaan energiatoimittajia, jotka käyttävät energiantuotannossa uusiutuvia energialähteitä tai tehokkaita sähköntuotantoprosesseja
- Parantamalla LTO:n suhdetta pääilmanvaihtokoneissa: huomioitava koneen kustannukset vs. takaisinmaksuaika energiansäästön näkökulmasta
- Tilakohtainen ilmanvaihto sekä valaistus huomioiden tiloissa järjestettävän toiminnan sekä hetket jolloin tyhjiällä (esim. ilmanvaihdon pienennys ja valaistus kytkeytyy pois automaattisesti)
- Suosimalla pitkiä takuu-aikoja
- Varmistamalla, että huoltoa vaativille koneille ja laitteille on vapaa pääsy sekä laitteet on merkattu selkeästi: vaikutus mm. ilmanvaihtokoneiden suodatinten vaihtoon

## **C1-C4 Elinkaaren loppu - GWP vähennystoimenpiteet ja kustannukset**

- Suunnitteleamalla rakenteet helposti purettavaksi, uudelleenkäytettäväksi ja kierrätettäväksi
- Rakenneosat ovat eriteltyinä esim. kantavat rakenteet- ja ei kantavat rakennusosat
- Rakenneosat ovat selkeästi eroteltavissa purkuvaiheessa ja asennus/purkujärjestys tiedossa
- Hallittu purkutyö sektoreittain on toteutettavissa ja huomioitu suunnittelun aikana
- Rakennusaikaiset dokumentit ovat taltioituna mm. asennusjärjestys sekä asennussuunnitelmat, jotka ovat hyödynnettävissä rakennuksen elinkaaren loppuvaiheessa.
- Detaljiikka on selkeää sekä mahdollistaa tavanomaisten ja vakiintuneiden työtapojen käytön purkutyössä

## 4.3 Rakennuksen muotokerroin vähähiilisyyden arvioimiseksi tarve- ja hankesuunnitteluvaiheessa

Rakennuksen energiankulutuksen sekä hiilijalanjäljen arviointi on vaikeaa suunnitteluprosessin alkuvaiheessa, koska suunnitteluvaihtoehtoja voi olla useita, eikä valintaa ole vielä tehtynä lopullisen vaihtoehdon osalta. Luonnossuunnitteluvaiheessa tulevaa rakennuksen elinkaaren käyttövaiheen (B6) energiankulutusta voidaan arvioida käyttämällä apuna rakennuksen muotokerrointa arkkitehtisuunnittelun työkaluna (kts. Lappalainen 2010, Moisio ym. 2018 sekä Lylykangas ym. 2015). Periaatteellisesti tämä tarkoittaa, että rakennuksen ulkovaipan pinta-alaa verrataan joko rakennuksen lämmitettävään tilavuuteen tai lämmitettävään nettoalaan. Vaihtoehtoisesti voidaan käyttää myös painotettua rakennuksen pinta-alaa, joka huomioi rakenteiden eri lämmönläpäisyn (U-arvot) osana rakenteiden pinta-alojen kertoimia. Näitä kertoimia käytetään yleensä erillisinä, mutta niiden painotusta suunnittelussa voi käyttää haluamallaan tavalla. Alla on kuvattu muotokertoimien laskentaperiaatteita Moisio ym. 2015 mukaan. Huomioitavaa on, mitä pienempi muotokerroin on, sitä parempi rakennuksen muoto on tehokkuudeltaan (Kuva 53).

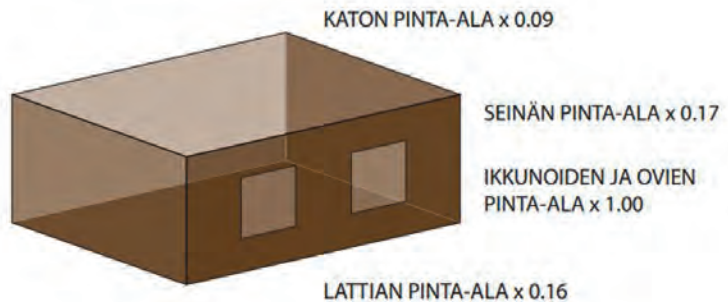
$A_v/V$  (ulkovaipan pinta-ala/lämmitettävä tilavuus), yksikkönä 1/m

$A_v/A_L$  (ulkovaipan pinta-ala/lattiapinta-ala), yksikkönä 1/m

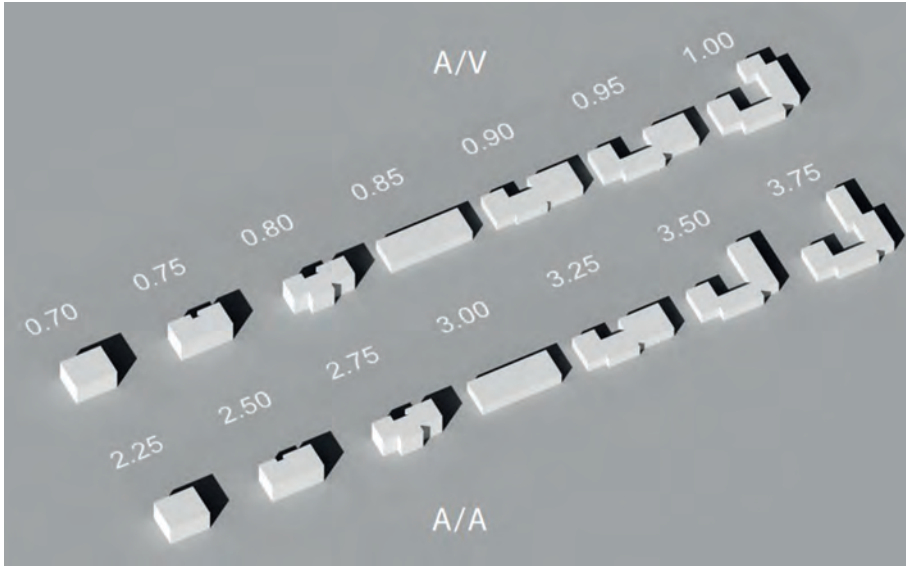
$A_{v, \text{painotettu}}/A_{\text{ohjelma-ala}}$  (tunnusluku huomioi painotettuna rakennusosien lämmönläpäisykertoimet yksikkönä 1/m)

PAINOTETTU MUOTOKERROIN

$A_{\text{ulkovaippa, painotettu}} / A_{\text{ohjelma-ala}}$



Kuva 52. Painotettu muotokerroin (Lylykangas ym. 2015).



Kuva 53. Lämmitettävän ulkovaipan muoto ja muotokertoimien vaihtelut (Lylykangas ym. 2015).

Muotokerroin ei ota kantaa, miten rakennus sijoittuu aukotuksien tai seinäpinta-alojen suhteen ilmansuuntiin nähden. Lämmitettävän ulkovaipan muoto ja muotokertoimien vaihtelut vaikuttavat myös rakennuksen energiankulutukseen (Lylykangas ym. 2015). Energiankulutuksen alkuvaiheen arvioinnissa olisikin tarpeen huomioida auringonsäteily, varjostavat rakenteet ja puusto sekä huonekohtaiset sijoitukset. Tarkastelu olisikin järkevintä toteuttaa suunnittelun alkuvaiheessa massamallin kautta sekä toteuttaa muotokerrotimeen perustuva arviointi ja energiasimulointi keskimääräisillä asetuksilla tarkastellen rakenteiden U-arvoja sekä mm. aukotuksen vaikutusta ilmansuunnittain (Vertaa kohta: 3.2.3 Energiaratkaisut ja energiatehokkuus). Muotokerroin ei ota myöskään kantaa tilaohjelmaan, jolla on myös vaikutusta muuntojoustavuuteen sekä tilojen käytettävyyteen.

On kuitenkin tiedostettava, että vertailu voidaan toteuttaa luotettavasti saman tilavuuden sekä korkeuden omaaville rakennuksille. Toisaalta on mahdollista käyttää jatkokehittävää yhdenmukaistamiskerrointa, joka huomioi rakennuslukumäärän hiilijalanjäljessä vähentävästi rajoittuen tiettyyn kerroslukumäärään. Ylitettäessä esim. kahdeksan kerrosta on vaikutus hiilijalanjälkeä nostava johtuen raskaammista perustusrakenteista sekä vaikuttavien kuormitusten kasvamisesta mm. tuulikuormat.

Huomioitavaa on, että muotokerroin voi myös vääristää osaltaan mm. kantavien rakenteiden arvioituja poikkileikkauksia, jos siinä ei huomioida moduulijakoa, kerroskorkeuksia sekä jänneväljen pituuksia. Monikerroksisten rakennusten vertailussa vääristymää voi aiheuttaa se, ettei voida varmuudella tietää kuormitusten suuruuksien vaihtelua materiaali-kohtaisten toteutusvaihtoehtojen välillä, mukaan lukien puristusvoimat ja jäykistysseinien sijoittelut. Lisäksi rakennusvaihtoehdolle tyypilliset määräävät kuormitukset, kuten betonin puristus (omapainon osuus) sekä puurakennuksien lähes pistepäiset kuormitukset ja tuulikuormasta mahdollisesti aiheutuva noste.

### 4.3.1 Painotettu muotokerroin apuna elinkaaren vaiheen A1–3 arvioinnissa

Muotokerrointa sekä rakennuksen massoittelua voidaan käyttää hyväksi tarkasteltaessa rakennustuotteiden (A1 ja A3 vaihe) tuottamia ilmastovaikutuksia ilmastonlämpenemispotentiaalin osalta. Tarjolla arviointiin on olemassa kaupallisia sovelluksia, jotka hyödyntävät muotokertoimen periaatteita sekä kerroslukumäärää. Yhtenä esimerkkinä Bionovan OneClick LCA:n lisäosa Carbon Designer, joka hyödyntää tietokantaan syötettyjen kohteiden keskimääräisiä arvoja pinta-alojen sekä määrien osalta. Tuotekohtainen vertailu tehdään käyttäen verrokkina eri tuotteiden sekä materiaalien EPD-tietoja. Ohjelma antaa nopeasti eri vaihtoehtojen vertailuarvot sekä vaikutukset rakennusosittain, mutta se ei ilmoita suoraan esimerkiksi välipohjien kantavien rakenneosien materiaalipaksuuksia tai vaikutuksia lämmöneristävyyteen, palosuojaukseen tai ääneneristävyyteen.

Jos käytössä ei ole vastaavan tyyppistä kaupallista ohjelmaa, on vaihtoehtona toteuttaa yksinkertaistettu vaikutusarviointi tässä oppaassa ehdotetun menetelmän mukaisesti. Tällöin suunnittelija voi toteuttaa oman arvioinnin myös Excel-pohjaisesti tai osana monitavoiteoptimointia (parametrinen tai algoritminen). Tällöin voi hyödyntää painotetun muotokertoimen periaatteita ja painottamalla prosentuaalisesti eri rakennusosien osuutta A1–3 vaiheen kokonaispäästöistä (GWP-kgCO<sub>2</sub>e) rakennuskohteessa.

Kyseinen menetelmä vaatii kuitenkin pohjaksi useiden erilaisten kohteiden hiilijalanjälkilaskentatiedot, jotka ovat myös pääkäyttötarkoituksen osalta riittäviä edustavia otannan kannalta. Toisaalta käytettäessä prosentuaalista painotusta pinta-alojen suhteessa, ei tarvitse olla tiedossa vielä tarkkoja materiaali tai tuotetietoja rakenteiden osalta. Tällöin kyseessä onkin suuntaa antava indikaattori, jonka pohjalta voidaan toteuttaa myöhemmin tarkempi pinta-aloihin perustuva hiilijalanjälkiarvio rakennetyypeittäin siinä vaiheessa, kun rakennuksen haluttu muoto ja massoittelu on valittuna.

### 4.3.2 Pinta-aloihin perustava alustava hiilijalanjälkiarvio rakennuskohteelle

Rakennevaihtoehtojen sekä rakennetyyppien osalta arvoina voidaan käyttää eri rakennetyyppien keskimääräisiä päästöarvoja hyödyntäen esimerkiksi Ympäristöministeriön arviointimenetelmän arvoja tai rakennekirjastoja, joissa päästötiedot ovat ilmoitettuna (esim. [www.dataholz.eu](http://www.dataholz.eu).)

Muotokerrointa käytettäessä tulisi kuitenkin muistaa, että tällöin arvioinnissa tulee ottaa huomioon vain rakennuksen elinkaaren A1–5 vaiheiden todelliset määrälaskentaan perustuvat arvot ja kuljetusetaisyyksille keskimääräiset tuotekohtaiset tiedot. Arviointi taulukkoarvoihin perustuvilla määrillä mm. talotekniikan osalta tulisi ilmoittaa erillisenä tietona. Energiankulutuksen osalta olisi tärkeää käyttää tarve/luonnossuunnitteluvaiheessa esim. keskimääräisiä kaukolämmön GWP-tietoja Ympäristöministeriön menetelmäohjeen mukaisesti tai paikkakunnan sähkön- ja lämmöntuotannon keskimääräisiä päästötietoja arvioidulle todelliselle ostoenergialle ilman energiamuotokerrointa.

Jotta työkalu olisi mahdollisimman käyttökelpoinen eri pinta-aloille tulisi kohdistaa niille ominaisimpia tunnuslukuja luokituksien avulla, jolloin voidaan puhua ryhmittelystä. Alla esimerkiksi TALO2000-luokitukseen perustuva ryhmittely, jonka kautta on mahdollista saada määritettyä aikaisemman datan kautta painoarvot eri pinta-aloille. Alla oleva on esimerkinomaisesti ehdotus merkittävimpien luokituksien mukaiseen ryhmittelyyn. Tällöin verrataan ryhmittelyn yhteenlaskettua hiilijalanjälkeä (kgCO<sub>2</sub>e) A1–5 vaiheen kokonaishiilijalanjälkeen prosentuaalisesti:

**Katon pinta-ala (yläpohja):**  
1236 Yläpohjat, 126. Vesikatot,

**Seinien pinta-ala+ ikkunoiden ja ovien pinta-ala:**  
1232 Kantavat seinät, 124. Julkisivut

**Lattian pinta-ala:**  
111. Maaosat, 121. Perustukset, 122. Alapohjat, 1235 Välipohjat, 131. Tilan jako-osat, 132. Tilapinnat, 1233 Pilarit, 1234 Palkit, 1231 Väestönsuojat

Jotta luokitus olisi mahdollisimman tarkka sekä rakennuksen käyttötarkoitusta kuvaava on kerättävän tiedon oltava peräisin saman tilojen käyttötarkoituksen sekä laajuuden omavista rakennuskohteista. Käyttämällä todellisten kohteiden laskentatietoja hiilijalanjäljen osalta, voidaan saada parempi kokonaiskuva kuin toteuttamalla vertailu vain rakennetyyppikohtaiseen mallirakennukseen perustuen. Ryhmittäytyksen tulisi myös kattaa valtaosa rakennuksen A1-5) vaiheen osalta syntyvistä kg CO<sub>2</sub>e päästöistä (yli 80%).

Alla kuvatussa esimerkissä tarkastelussa on perusopetuksen koulurakennukset (katso kappale: 3. Rakennuskohteiden vertailu päästöjen näkökulmasta), jotka ovat vaadittavilta ominaisuuksiltaan, suunnitteluratkaisuilta sekä tilojen käytön osalta lähellä toisiaan. Merkittävimmät erot muodostuvat tällöin rakennuksen kerrosluvusta, maanalaisista kerroksista, laajuudesta sekä käytettävistä materiaaleista.

Kyseisten kohteiden hiilijalanjälkiarvioinnin pohjalta laadittiin esimerkinomaiset rakennuksen painotetut muotokertoimet aikaisemman mainitun periaatteen mukaisesti (Kuvat 54-55.). Betonirakenteisella rakennuksella on käytetty materiaali- ja painotuskerrointa 1,0 ja puurakenteisella sen sijaan painotuskerrointa 0,85. Puun materiaali- ja painotuskerroin näyttäisi olevan yleisesti linjassa aikaisempiin hiilijalanjäljenarviointituloksiin, joiden mukaan puurakenteinen rakennus on noin 30 % pienempi kuin vastaavan betonirakenteisen koulurakennuksen (kgCO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>) A1-3 vaiheessa.

Painotettu muotokerroin on laskettu kaavalla:

$$\text{Katon pinta-ala (YP)} * 0,10 + \text{Vaipan pinta-ala (US)} * 0,26 + \text{Lattian pinta-ala} * 0,60 / \text{Brutto-m}^2$$
  
Materiaalin painotuskerroin: betoni 1,0 ja puu 0,85

Energiatohokkuuden painotuskertoimet: katso kuva 52. Painotettu muotokerroin

Pääsääntönä on, että mitä pienempi on painotetun muotokertoimen luku, sitä parempi rakennus on energiatohokkuuden sekä hiilijalanjäljen kannalta. Muotokerroin pienenee myös rakennuksen koon sekä kerroslukumäärän kasvaessa.

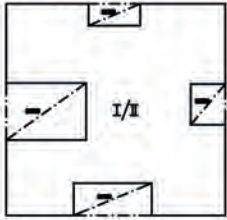


	Katto %	Vaippa %	Lattia %	Osuudet yht.% kattavuus	Brutto m <sup>2</sup>	kgCO <sub>2</sub> e/m <sup>2</sup>	%-koko	Sijointus
Kontioniemen koulu (betoni)	8 %	18 %	63 %	89 %	2919	262	22 %	2
Sivistyskeskus Maiju (betoni)	10 %	26 %	61 %	97 %	5362	233	20 %	4
Nepenmäen koulu (betoni)	9 %	27 %	61 %	97 %	11663	279	23 %	1
Kuhmonkadun kampus (puu)	4 %	34 %	58 %	96 %	3091	179	15 %	5
Pikku-Kaarle (puu)	29 %	18 %	50 %	97 %	1124	236	20 %	3
Yhteensä					23035	953		
kokonais-% painotettuna	10 %	26 %	61 %					
mediaani	9 %	26 %	61 %	97 %				
keskiarvo	12 %	25 %	59 %	95 %				
Katon muotokerroin	10 %							
Vaipan muotokerroin	26 %							
Lattian muotokerroin	60 %							
Kattavuus	97 %							

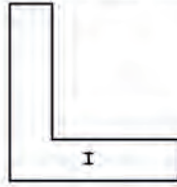
Kuva 54. Koulurakennuksien A1–A5 vaiheiden prosentuaaliset osuudet rakennuksen kokonaishiilijalanjäljestä sekä siitä johdettu painotetun muotokertoimen arvo.

Tarkasteltaessa neliökohtaisia ilmastonlämpenemispotentiaalintuloksia (kgCO<sub>2</sub>e/m<sup>2</sup>) voidaan huomata, että suurimmat hiilijalanjälkiarvot ovat Nepenmäen betonirakenteisella koulurakennuksella ja pienimmät Kuhmonkadun puurakenteisella koulurakennuksella (Kuva 54.).

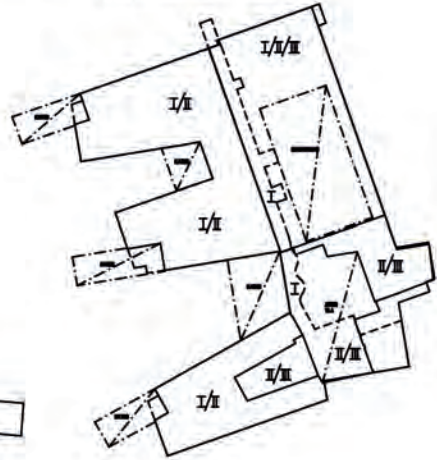
Tohmajärven  
sivistyskeskus



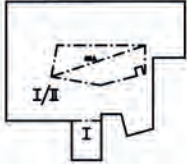
Nurmes Pikku-Kaarle



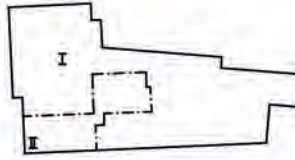
Nepenmäen koulu



Kuhmonkadun kampus,  
Lieksa



Kontioniemen koulu



	Krs- lkm	Katon pinta-ala (m <sup>2</sup> )	Brutto- pinta-ala (m <sup>2</sup> )	Seinän pinta-ala (vaippa m <sup>2</sup> )	Ikkunoiden ja ovien pinta-ala (m <sup>2</sup> )
Kontioniemen koulu (betoni)	2	2141	2919	1182,4	253,4
Sivistyskeskus Maiju (betoni)	2	2890	5362	1604	789
Kuhmonkadun kampus (puu)	2	1598	3090,5	1066	342,6
Nepenmäen koulu (betoni)	3	5975,9	11663	4585,8	1128
Pikku-Kaarle (puu)	1	1056	1123,5	732	126

Kuva 55. Koulurakennusten pinta-ali tiedot.

Käyttämällä rakennuksen painotettua muotokerrointa alustavassa suunnittelussa saadaan jo suuntaa antavia tuloksia siihen, miten rakennuksen muoto voi vaikuttaa hiilijalanjälkeen. Lisäksi käytettäessä sitä yhdessä energiatehokkuuden painotetun muotokertoimen kanssa, voidaan tehdä kokonaisvaltaisempia johtopäätöksiä (Kuva 56.).

Energiatehokkuutta arvioitaessa on kuitenkin huomioitava, että painotetun alan kertoimia voidaan muuttaa vastaamaan tavoitearvoja mm. rakennusosien U-arvojen osalta. Tämä näkyy osaltaan kohteiden todellisista energiatodistuksissa ilmoitetuista ostoenergian sekä energiamuotokertoimella huomioituissa arvoissa (Kuva 56.).

	HIILIJALANJÄLKI				ENERGIATEHOKKUUS		
	Painotettu AV (m <sup>2</sup> )	Painotettu ohjelma ala (m <sup>2</sup> )	AV'/AAO' Muotokerroin	Sijoitus	Painotettu ohjelma ala (m <sup>2</sup> )	AV'/AAO' muotokerroin	Sijoitus
Kontioniemen koulu (betoni)	2368	2919	0,81	1	1114	0,38	3
Sivistyskeskus Maiju (betoni)	3977	5362	0,74	4	2180	0,41	2
Kuhmonkadun kampus (puu)	2322	3091	0,64	5	1162	0,38	4
Nepenmäen koulu (betoni)	8904	11663	0,76	2	4312	0,37	5
Pikku-Kaarle (puu)	981	1124	0,74	3	525	0,467	1

	Todellinen ostoenergia kWh/(m <sup>2</sup> vuosi)	kWhE/ (m <sup>2</sup> vuosi)	Energiatehokkuusluokka
Kontioniemen koulu (betoni)	129	91	B
Sivistyskeskus Maiju (betoni)	88	66	A
Kuhmonkadun kampus (puu)	131	93	B
Nepenmäen koulu (betoni)	84	96	B
Pikku-Kaarle (puu)	EI SAATU TIETOJA	EI SAATU TIETOJA	EI SAATU TIETOJA

Kuva 56. Koulurakennusten energiakulutuksen tietojen koonti ostoenergian ja energiamuotokertoimella painotetun arvon osalta.

Jotta rakennuksen muotokerrointa voidaan tulevaisuudessa entisestään kehittää, se vaatii osaltaan eri osatekijöiden huomiointia alakohtien lisäkertoimina. Tällaisia tarkentavia kertoimia voidaan muodostaa siinä vaiheessa, kun rakennuskohdekohtaisia todellisia elinkaaren päästötietoja on riittävästi saatavilla pääkäyttötarkoituksen, laajuuden, kerrosluvun, maanalaisten kerrosten sekä pääasiallisen rakennusmateriaalin osalta.

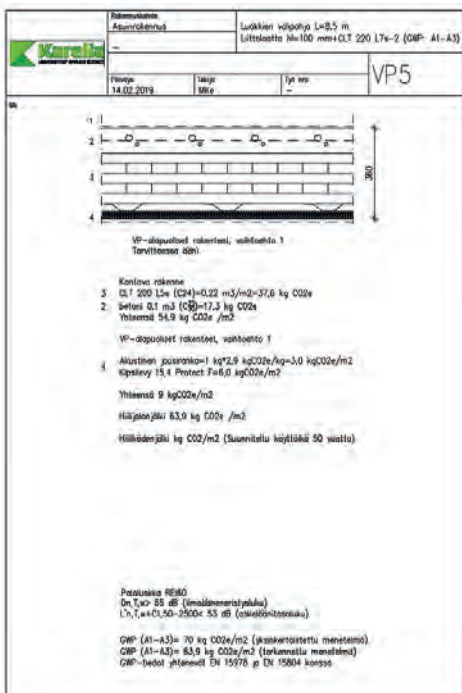
# 4.4 Tietojen ilmoittaminen suunnitteludokumenteissa

Ympäristöministeriön ”Rakennuksen vähähiilisyys arviointimenetelmä” ei ota suoraan kantaa siihen, kuinka GWP- hiilijalanjälkiarvot tulisi ilmoittaa rakennuksen asiakirjoissa. Yleisesti ottaen rakennetyypit sisältävät oleellisten tietojen osalta tiedot rakenteen lämmönjohtavuudesta (ulkoilmaa vasten olevat rakenteet), ääneneristävyyden osalta (ilma- ja askelääni tilojen väliset rakenteet) sekä palokeston- ja eristävyyden osalta (RE, EI ja REI).

Hiilijalanjälkilaskijan työn helpottamiseksi olisi kuitenkin suotavaa ilmoittaa rakennetyypeissä rakennekerroksien osalta tarkemmin ajateltu materiaali tai tuote alla olevan esimerkin mukaisesti.

”Mineraalivilla. Materiaali vähintään A2-s1, d0, lambda=0,036 W/mK. Esim. Paroc eXtra”.

Tällöin lämmöneristysmateriaalien keskinäinen vertailu on sujuvampaa sekä perustuu samoihin teknisiin vaatimuksiin, jolloin voidaan välttää aikaisemmin mainitut potentiaaliset virheet hiilijalanjäljen arvioinnissa. Hiilijalanjäljen osalta tiedot voidaan merkata rakennesuunnittelijan osalta näkyviin yleisten tietojen lisäksi rakennetyyppisivun alareunaan muiden yleisten tietojen tapaan (Kuva 57.).



Kuva 57. Rakennetyyppien merkkäminen ja GWP-tasojen ilmoittaminen suunnitteludokumenteissa.

## 4.5 Tuotteiden päästöarvot ja niiden valinta

Jotta rakennuskohteiden päästötiedot voidaan arvioida luotettavalla tasolla, on arvioinnin tekijällä osaltaan vastuu valita ne EPD tiedot, jotka vastaavat mahdollisimmat hyvin suunnitelmissa mainittuja materiaaleja tai rakennushankkeen toteutusta vastaavia käytettyjä materiaaleja. Tietokantojen sekä ympäristöselosteiden valintaan voidaan tällöin käyttää EU Level(s) ja YM:n arviointimenetelmän laadunarviointia valintojen osalta.



Kuva 58. Esimerkkejä eri EPD-tietokannoista (LCI)

On kuitenkin tiedostettava, että rakennushankkeen eri vaiheissa suunnitelmat voivat päivittyä, jolloin arvioinnissa käytettäviä ympäristöselosteita on osaltaan päivitettävä vastaamaan päivittyviä rakennussuunnitelmia- ja asiakirjoja. Päivitykset tietokantojen tai ympäristöselosteiden osalta on raportoitava, jotta voidaan edistää tehtävän arvioinnin läpinäkyvyyttä ja luotettavuutta.

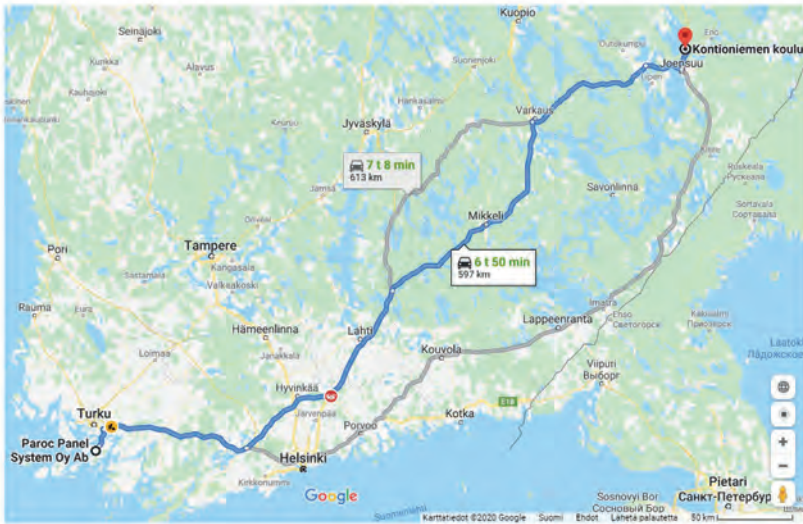
## 4.5.1 Maantieteellinen edustavuus

Arvioinnissa tulisi valita EPD, joka vastaa maantieteellisesti parhaiten rakennuspaikan todellista sijaintia. Esimerkiksi Suomessa kannattaa käyttää EPD tietoja, jotka ovat suomalaisista LCI- tietokannoista. Jos käytössä ei ole täysin maantieteellisesti vastaavaa tuotetta niin tulisi etsiä vastaava pohjoismainen. Tämä siitä syystä, että tuotteiden materiaaliominaisuudet ovat tällöin todennäköisesti suunniteltu vastaamaan Suomen ilmasto-olosuhteita ja suunnitteluvaatimuksia.

Alla periaatteet EPD:n arvottamisesta maantieteellisen sijainnin osalta:

1. Saman kohdemaan EPD tietokanta esim. RTS-EPD tai generinen arvo VTT
2. Pohjoismaat
3. Länsi-Eurooppa / Itä-Eurooppa
4. Etelä-Eurooppa
5. Muut maantieteelliset alueet esim. Intia, Australia, Yhdysvallat jne.

Kyseisellä valinnalla on myös vaikutuksia elinkaaren vaiheen A4 vaiheen kuljetuksiin. Ympäristöselosteissa mainitut keskimääräiset kuljetusetäisyydet on joissain tilanteissa hyvä tarkastaa käyttämällä valmistajan lähimmän tehtaan sijaintia verrattuna kohteen sijaintiin. Esimerkinä Paroc-kivillarakennuseristeiden kuljetukset Kontioniemen koulun työmaalle.



Transports to the customer are calculated on the basis of a scenario with an average truck trailer with a 27 t payload. For the final stone wool product a loading ratio of 30 % has been set. The average transport distance to the customer in Norway is assumed to be 500 km as a basis for this study. The assumption is based on a 300 km distance for the Swedish plants and a 700 km distance for the Finnish plants. Since the two Swedish plants contribute with a share of 50% and the three Finnish plants with a share of 50%, the weighted average distance is set to 500 km.

### Transport from production place to user (A4)

Type	Capacity utilisation (incl. return) %	Type of vehicle	Distance km	Fuel/Energy consumption	Value (l/t)
Truck	30	Truck fleet	500	0,038 l/tkm	18,9

Kuva 59. Kuljetusetäisyydet Paroc Paraisten tehtaalta ja Paroc- kivillaeristeen EPD: n mukaiset tiedot (epd.norge.no, NEPD00237E): todellinen etäisyys kohteelle 597 km ja keskimääräinen kuljetusetäisyys 500 km.

Tarkasteltaessa todellisia kuljetusetäisyyksiä EPD:ssä ilmoitettuihin voidaan niiden olevan lähes linjassa keskenään (Kuva 59.). Tilanne voi kuitenkin todellisuudessa olla eri, jos materiaali on ostettu jälleenmyyjän kautta. Tällöin välivarastojen etäisyyksiä tai kuljetuksia ei voida osoittaa riittävällä varmuudella ja joudutaan käyttämään, joko EPD tietoa tai todellisia kuljetusetäisyyksiä. Kuljetusetäisyydet voivat olla myös suuremmat tai pienemmät jos kohde sijaitsisi muualla päin Suomea. Jos erillisiä tietoja ei ole saataville kuljetusetäisyyksille voidaan käyttää etäisyytenä 300 km rakennustuotteille, valmisbetonituotteille 80 km ja sora- ja maa-ainekuljetuksille 20 km A4 moduulin osalta (EEBGuide 2012)

## 4.5.2 Teknologinen edustavuus

Teknologisen edustavuuden kannalta on tärkeää tunnistaa tuotteen tekniset ominaisuudet eri käyttötarkoitusten mukaisesti. Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että huomio kiinnitetään valintojen osalta kullekin rakennusosalle eniten vaikuttaviin teknisiin ominaisuuksiin. Rakennusosittain tarkasteltaessa on tällöin kiinnitettävä huomiota useisiin teknisiin ominaisuuksiin ajatellusta käyttötarkoituksesta riippuen.

Kantavien rakenteiden osalta kiinnitettävä erityistä huomiota lujuusominaisuuksiin kuten betonin lujuusluokkaan esim. C25/30 sekä puumateriaaleilla onko LVL-C (esim. Kerto-Q tai LVL-X) levyä tai kerrannaisliimattua LVL-G tuotetta tai CLT levyä.

Eristävien ja suojaavien materiaalien osalta lämmöneristeenä tai palosuojuuksessa on EPD:n valinnassa kiinnitettävä huomiota lämmönjohtavuuteen ( $\lambda$ -arvo), materiaalin solurakenteeseen sekä pinnoitukseen (PIR vs. XPS) sekä rakennusmateriaalin tiheyteen (esim. kipsilevyt ja palovillat). Kosteus- ja höyrynsulkuna toimivien materiaalien osalta vesihöyrynläpäisevyyteen/-vastukseen, materiaaliin sekä materiaalipaksuuteen tai neliöpainoon ( $\text{g}/\text{m}^2$ ). Esimerkiksi PU (polypropeeni) vs. PP-kalvo (polypropyleeni) vs. tervapaperi (bitumivuorauspaperi), joilla on samasta käyttötarkoituksesta riippumatta hyvinkin erilaiset tekniset ominaisuudet sekä hiilijalanjälki.

Terästuotteiden ja kiinnitysosien osalta huomioitavia asioita mm. pintakäsittely sinkitys (sähkösinkitty vai kuumasinkitty), käsittelemätön vai maalattu (pulverimaalaus vs. sively/spray). teräsputkien, rakenneputkien- ja profiilien osalta tunnistettava valmistusprosessi (kylmämuovattu, kuumamuovattu vai hitsattu profiili). Tärkeää myös tunnistaa teräksen lujuusluokka esim. S235, S355 vai korkealujuusteräs. Yleensä terästuotteiden EPD:t sisällyttävät samaan EPD:hen useita lujuusluokkia esim. S235+S355J+S355J2.

Betonituotteiden osalta on myös huomioitava, onko rakennusasiakirjoissa mainittu erikseen esim. betoni nopeasti kovettuvaa/hitaasti kovettuvaa tai onko säänkestolle asetettu vaatimuksia. Erikoisbetonien osalta mainittavia ovat esim. korkealujuusbetonit sekä pakkasbetonit (P-luku). Nämä tulee huomioida EPD:tä valittaessa ja tarkistettava mainitut betonin lisäainetiedot, jotka näkyvät suunnittelusasiakirjoissa sekä EPD tiedoissa.

Kierrätysasteen huomiointi osaltaan on tarpeen eli paljonko kyseisen tuotteen tai materiaalien osuudesta on kierrätettyä materiaalia. Esimerkiksi teräksellä kierrätysaste yleensä 97 %, mutta voi olla myös käytetty neitseellistä materiaalia. Tuotteella voi olla myös ympäristöystävällisimpiä vaihtoehtoja perustuotteelle esimerkkinä Peikko Delta (23079,0 kg  $\text{CO}_2\text{e}/\text{m}^3$ ) vs. Peikko Delta Green (käsittelemätön 9106,00 kg  $\text{CO}_2\text{e}/\text{m}^3$ , maalattu 9498,5 kg  $\text{CO}_2\text{e}/\text{m}^3$ , sinkitty 12246,0 kg  $\text{CO}_2\text{e}/\text{m}^3$ ) (RTS EPD 2020a, RTS EPD 2020b, RTS EPD 2020c, RTS EPD 2020d) Betonin osalta on voitu käyttää tuotannossa vaihtoehtoisia sideaineita, jotka yleensä 10–25 % tai kyseessä neitseellinen materiaali eikä vaihtoehtoisia sideaineita. Puutuotteilla kierrätettyjä materiaaleja on voitu hyödyntää esim. selluvillassa tai levytuotteissa. Joissain tapauksissa tuotteet on voitu hyödyntää uusiokäytössä kokonaisina rakennusosina esim. palkit ja pilarit. Jos kyseessä on uusiokäytetty tuote. Se mainitaan tai tulisi mainita erikseen rakennusasiakirjoissa, jolloin päästöjä ei tarvitse laskea uudestaan A1-A3

vaiheen osalta, mutta muut rakennuksen elinkaaren vaiheet tulisi huomioida kuten mm. huolto valmistajakohtaisen tiedon mukaan tai ” RT 18-10922 Kiinteistöjen tekniset käyttöiät ja kunnossapitajaksot” ohjeen mukaiset käyttöiät.

### 4.5.3 Ajallinen edustavuus

Ajallinen edustavuus on tärkeää huomioida etenkin tuotteilla, joissa on odotettavissa ympäristötehokkuuden parannuksia tuotantoprosessissa, tuotteen materiaalimäärien optimoinnissa tai kierrätysasteessa. YM:n arviointimenetelmässä ajallisena edustavuutena alinta luokitusta käytetään, kun tiedon validoinnin ja hyödyntämisen välillä on yli 6 vuotta, keskimääräisenä 2-4 vuotta ja parhaana edustavuutena kun aikaa on kulunut alle 2 vuotta. Laskennassa tulisi käyttää EPD tietoja, joiden voimassaoloaika ei ole umpeutunut laskenta-ajankohtana. (Ympäristöministeriö 2019)

Arvioinnin laatijan ei kuitenkaan ole järkevää vaihtaa esim. valmistajakohtaista EPD:tä ajalliselta edustavuudeltaan toisen valmistajan EPD:hen vain kyseisen arviointikriteerin vuoksi. Ensisijaisena voidaan pitää sitä, että maantieteellinen edustavuus sekä teknologinen edustavuus täytyvät. Materiaalien tai tuotteiden EPD tietoja tulee kuitenkin määräjoihin tarkistaa tietojen osalta, jotta arvioinnissa voidaan käyttää valmistajan ajantasaisinta tietoa. Ne kohteet, joissa hiilijalanjäljenlaskenta toteutetaan jälkilaskentana, tulisi käyttää rakentamisaikaa vastaavaa saatavilla ollutta voimassaollutta EPD:n julkaisua (jos vain mahdollista). Jos käytetään laskentahetken viimeistä GWP- arvoiltaan pienempää EPD:tä voivat tulokset vääristyä.

Esimerkinä otettakoon tähän Saint-Gobainin Gyproc Protect F-FireBoard palokipsilevy. Kyseiselle tuotteelle on saatavissa kolme eri EPD:tä, jotka ovat kaikki voimassa olevia vuonna 2020. Palokipsilevyn tarkasteluyksikkönä GWP:n osalta on käytetty kaikissa 1 m<sup>2</sup> alaa ja FireBoard levyn painona kummassakin Pohjoismaisessa (Ruotsi ja Norja) 12,7 kg/m<sup>2</sup>. Eron näiden ympäristöselosteiden osalta on tarkastelujakson pituus, jotka ovat Suomessa ja Ruotsissa 50 vuotta ja Norjassa 60 vuotta. Arvioija voi tässä tapauksessa pienentää levyjen kokonaishiilijalanjälkeä yli 2 %...3% ((2,66-2,6)/2,60\*100=2,3 %) halutussa kohteessa pelkäästään EPD:n valinnalla kun maantieteellisenä alueena sallitaan käyttää Pohjoismaisia tietokantoja (maantieteellisen edustavuuden pisteitys 2, Ympäristöministeriön arviointimenetelmässä). Jos laskenta-ajanjaksoa ei olisi huomioitu olisi ero ollut yli 23 %. Eriäviä tietoja voidaan käyttää sen takia, että ympäristöselosteiden voimassaoloajat ovat päteivät laskentahetkellä.

Suomessa sijaitsevalle tehtaalle on myös löydettävissä EPD, joka on tehty tuotteelle Gyproc GFL 15 Fireline - Fireboard (12,8 kg/m<sup>2</sup> ja 853 kg/m<sup>3</sup>). Tarkasteluyksikkönä 1 m<sup>2</sup>. Laskija voisi halutessaan huonontaa saatavaa hiilijalanjälkeä valitsemalla huonoimman hiilijalanjälkiarvon tuotteelle eli EPD S-P-00389 2,66 kg CO<sub>2</sub>e/1 m<sup>2</sup>, joka vääristää tuloksia yli 7 % neliometriä kohden tai toisinpäin haluttaessa parantaa tietoja Ruotsissa tehtävälle kohdearviointille. Kyseisen EPD:n maantieteellinen edustavuus olisi paras Suomessa rakennettavalle kohteelle.

Todellisena kipsilevymäärän laskennallisella vähentämisellä tämä tarkoittaisi esim. omakotitalolla tarkasteluajanjakso 60 vuotta:

$$100 \text{ m}^2 \text{ kipsilevyä} * 2,66 \text{ kgCO}_2\text{e/m}^2 = 266 \text{ kgCO}_2\text{e} \text{ vs. } 100 \text{ m}^2 \text{ kipsilevyä} * 2,48 \text{ kgCO}_2\text{e/m}^2 = 248 \text{ kgCO}_2\text{e}$$

$$\text{Erotus EPD välillä } 266 \text{ kgCO}_2\text{e} - 248 \text{ kgCO}_2\text{e} = 18 \text{ kgCO}_2\text{e}, \text{ joka on neliöinä } 18 \text{ kgCO}_2\text{e} / 2,66 \text{ (kgCO}_2\text{e/m}^2) = 6,76 \text{ m}^2.$$



Kyseinen ala yhden puolen levytyksenä ollen seinämittoina korkeus 2,5 m ja leveys 2,7 m.

Tällöin kyse onkin osaltaan siitä, mitä tietokantaa halutaan käyttää arvioinnissa. Maantieteellinen edustavuus on sama Ruotsin ja Norjan osalta, kun rakennuskohde sijaitsee Suomessa. Parhaita maantieteellistä edustavuutta taas edustaisi Kirkkonummen tehtaassa EPD:n tiedot Suomessa. Kyseinen menettelytapa päästöjen vähentämiseksi/lisäämiseksi EPD valinnoilla ei ole suotava EN-standardin mukaisessa hiilijalanjäljenarvioinnissa, mutta kyseinen menettely huomattaisiin todennäköisesti vasta tehtäessä laadunarviointia ulkopuolisen henkilön toimesta. Kyseinen laadunarviointi ei ole nykyisellään pakollinen kohteiden arvioinnissa. Alla tiedot ympäristöselosteista sekä miten arvot on muutettu yhtenäisiksi tarkastelua varten (Kuva 60.).

Laadittu	Voimassa	Valmistuspaikka	EPD tietokanta	EPD No.	Laskenta-ajanjakso vuosina	GWP kg CO <sub>2</sub> e/1 m <sup>2</sup>
13.01.2016	13.01.2021	Bålsta, Sweden	The International EPD system/ ECO Platform	S-P-00389	50	3,2 Muunnettu 60 vuodelle $3,2E+00/(60/50)=2,66E+00$
24.02.2017	24.02.2022	Fredrikstad, Norway	epd-norge.no	NEPD-1264-406-EN	60	2.60
14.11.2019	22.08.2024	Kirkkonummi, Finland	The Building Information Foundation RTS rs	RTS_34_19	50	2,98 Muunnettu 60 vuodelle $2,98E+00/(60/50)=2,48E+00$

Kuva 60. Tiedot ympäristöselosteista sekä niistä johdetut yhtenäistarkastelua varten.

## 4.6 Rakennuksen rakenteellisen tehokkuuden arviointi rakennesuunnittelussa

Rakennuksen rakenteellisen tehokkuuden arviointiin voidaan käyttää apuna, joko kuormituksen suhdetta poikkileikkausten suhteisiin tai kokonaispinta-alaan verrattuna. Yleensä mittarina käytetään rakennusosien käyttöasteita kuvaamaan sitä, miten mitoituskuormat suhteutuvat materiaalin tai rakennusosan lujuusominaisuuden mitoitusarvoihin (käyttörajoissa, taipumat/siirtymät/muodonmuutokset sekä murtorajoissa rakenteen sortuminen tai murtuminen). Joissain vähähiilisyttä tarkastelevissa tutkimuksissa on esitetty, että mitoituksessa tulisi pyrkiä 100 % käyttöasteeseen. Kyseinen suositus on kuitenkin ymmärrettävä asiakontekstissa ja sitä ei tule sellaise-

naan soveltaa kaikkiin rakenteisiin vähähiilisyden kriteerinä. Rakenteen käyttöasteeseen, kun vaikuttaa ulkoisten kuormitusten lisäksi myös rakenteen omapaino esimerkkinä alla oleva havainnollistava kuva 61. Käyttöaste ei kerro suoraan onko valittu ratkaisu lopulta vähähiilisiin materiaalinkäytön ja poikkileikkauksen osalta. Tällöin on järkevämpää asettaa esim. urakka-asiakirjoissa tavoitteeksi käyttöasteen lisäksi ilmoitettava erillinen suhdeluku kuvaamaan kuormituksen sekä materiaalmäärän suhdelukuja esim. teräsbetonirakenteilla ilmoitettuna raudoitussuhde  $\text{kg/m}^3$  ja teräsrakenteilla  $\text{kg/m}$ .

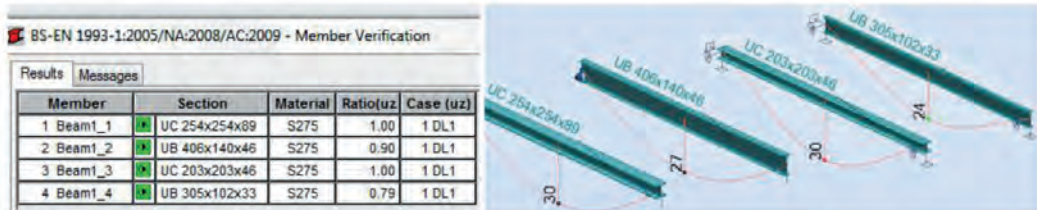


Fig. 2.3. Several beams on the same material, under the same span/load conditions: while self-weights vary between 33 and 89 kg/m, all utilisation ratios are above 72%. Coincidentally, the lightest beam is also the stiffest, but has the second worst utilisation factor. Software: Robot Structural Analysis by Autodesk.

Kuva 61. Käyttöasteen ja poikkileikkauksen yhteys (Mena 2020a).

Teräsrakenteilla sekä esijännitetyillä rakenteilla on yleisenä tavoitteena toisaalta päästä mahdollisimman lähelle 100 % käyttöastetta. Niissä rakenneosissa, joissa ei voida täysin varmistua tarkoista valmistus- tai rakentamistoleransseista on järkevämpää käyttää suunnittelijan harkintaa käyttöasteen osalta tai asettaa tarkennettuja vaatimuksia toleranssien osalta valmistuksessa- sekä rakentamisvaiheessa. Käyttöasteen lisäksi tulee muistaa myös rakenteellista vaatimuksista sekä määräyksistä johtuvat minimipoikkileikkaukset mukaan lukien toiminnalliset ääni- ja palotekniset vaatimukset rakenteille. Kyseinen seikka rajoittaa osaltaan poikkileikkausten optimointia ja ne tulee huomioida kokonaiskuvassa haluttaessa pienentää rakenteiden aiheuttamaa hiilijalanjälkeä.

Rakenteellisen tehokkuuden arvioimiseksi on esitetty koko rakennuksen rakenteellisen tehokkuuden todentamista: rakenteellisen tehokkuuden luokitusjärjestelmä (Structural Efficiency Classification System). Kyseinen luokitusjärjestelmä luokittelisi energiatodistuksen tapaan rakennukset eri luokkiin käyttäen pohjana aikaisempien toteutettujen rakennusten suunnitelmien tietoja keskimääräisten vertailutietojen pohjana tai teoreettisten mallien tietoja käyttäen. (think thank engineering n/d) Vertailu toteutetaan rakennusosien kautta laskettuna käyttäen tietona rakennukseen vaikuttavien kuormitusten sekä rakennusosien jännevälien ja korkeuksien suhdelukuja. Kyseisten rakennusosien painotettua verrataan tämän jälkeen rakennuksen tulevaan suunniteltuun pinta-alaan. Tämä vaatiikin tällöin jo luonnossuunnitteluvaiheessa alustavan rakennesuunnittelun varhaista mukaanottoa. Kyseinen luokitusjärjestelmä on kuitenkin vielä kehitysasteella, mutta tuo esille huomionarvoisen lähestymisnäkökulman rakenteellisen tehokkuuden parantamiseksi.

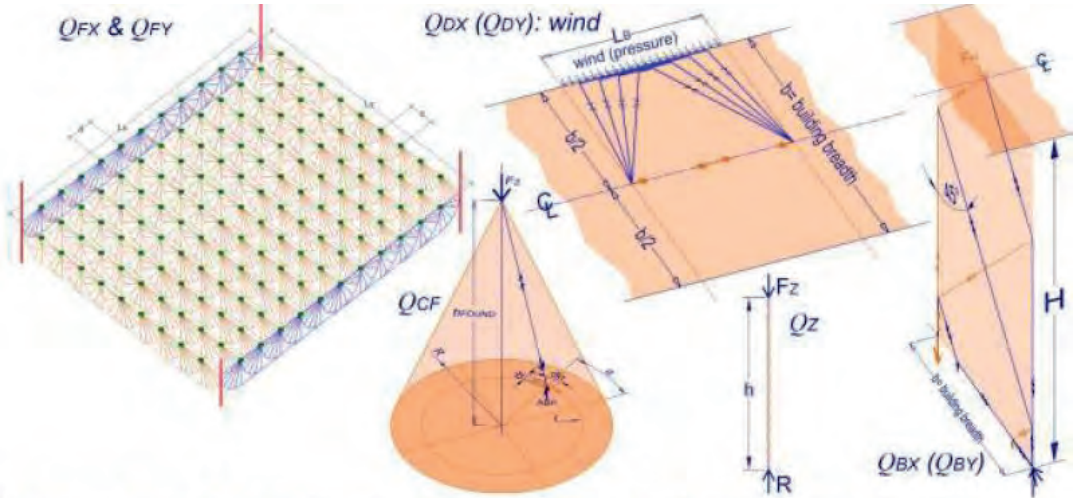


Fig. 3.5. BtK\_ver.2020.0: defining geometry of BtK sub-models behind each main Stress Volume component

building components	sub-models, vertical loading	sub-models, horizontal loading
floor, spanning X	trusses in bending*: $Q_{FX}$	diaphragm*: $Q_{DX}$
floor, spanning Y	trusses in bending*: $Q_{FY}$	diaphragm*: $Q_{DY}$
vertical members	columns: $Q_z$	bracing X* and Y*: $Q_{BX}$ ; $Q_{BY}$
foundations	centred footings: $Q_{CF}$	lateral restraint X and Y**
retaining	N/A	retaining walls: $Q_R$

\* Components implementing (for now) a near-optimal solution instead of the exact analytical

\*\* Not included in this version (2020.0) of the Best-to-Knowledge model

Table 3.1. Main BtK component sub-models

Kuva 62. rakenteellisen tehokkuuden arviointiperiaate (Mena 2020b)

**Table 3.3**  
SE Classes and generic criteria to revise them periodically as per market and state of the art for each given time.

SE Class	Revision Criteria
A+	Paradigmatic examples of structural efficiency
A	Designs above cost-efficient optimisation
B	Highly optimised designs that are also cost-efficient
C	Designs with some level of optimisation
D	Designs achieving an average efficiency
E, E, G	Inefficient designs

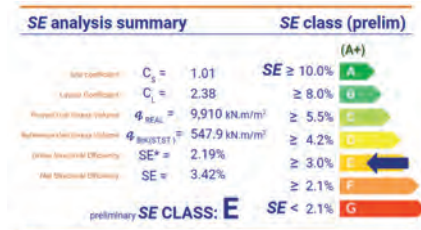


Fig. 4.4. Example of S.E.C.S. report summary (ver.2020.0), Case Study: Resi.

Kuva 63. Rakenteellisen tehokkuuden (SE structural efficiency) luokitusperiaate (Mena 2020b)

## 4.7 Rakennuksessa vaikuttavien voimien (Newton) hiilijalanjäljen mukainen vertailu

**H**aluttaessa muuttaa rakennuksessa vaikuttavat voimat hiilijalanjäljeksi, tulee ensin määritellä millä materiaalilla kukin voimasuure esim. puristus, leikkaus tai veto olisi järkevintä vertailla. Tällöin vaihtoehtojen välisessä vertailussa ei vertailu la niinkään materiaaleja vaan kuvitteellisia poikkileikkauksia materiaaliominaisuuksien kautta johdettuna.

Tällöin puristusvoiman vertailuun kannattaa valita materiaali, joka soveltuu parhaiten kyseiselle voimasuurelle. Puristukselle voidaan valita poikkileikkaukseksi betoni (ilman raudoitusta) tai LVL-tuote. Vedolle soveltuvat parhaiten terästuotteet kuten esim. harjateräs ( $f_{yk}=500 \text{ N/mm}^2$ ). Tällöin poikkileikkaus voidaan ymmärtää ohuena tasaisesti tuettuna levynä, joka kestää kyseisen voiman ilman lommahdusta, kiepahdusta, nurjahdusta tai tyssäntymistä. Tällöin vaikuttava kuormitus (ominaisarvo tai suunnitteluarvo) muunnetaan Newtoniksi, joka vaikuttaa paksuudeltaan yhden millimetrin suuruiseen rakennekerrokseen, jolle sallitaan pinta-ala suhteessa sen puristus- tai vetokestävyyteen ( $\text{N/mm}^2$ ).

Esimerkiksi otettakoon väliseinä, johon vaikuttaa vetovoima/noste elementin päässä. Normaalitytapauksessa rakennesuunnittelussa tälle kohdalle tulisi valita harjateräsraudoitus tai puurakentamisessa kiinnitysosa, jolla on kapasiteettia vastustaa kyseinen voima. Ongelmaksi muodostuu kuitenkin, että tämän mukaisessa tarkastelussa tulisi huomioida se kuinka pitkä on ankkurointipituus harjateräksen poikkileikkaukselle tai paljonko kiinnikkeitä tarvittaisiin materiaalista riippuen esim. puurakenteissa. Vaihtoehtoja on lukuisia etenkin tehtäessä monitavoiteoptimointia. Tällöin on lopulta järkevintä käyttää kuvitteellista poikkileikkausta, joka ei ole riippuvainen mm. liitettävistä materiaaleista. Alla esimerkiksi, jolla vetovoima voidaan muuttaa kiloiksi harjaterästä sekä kiloiksi  $\text{CO}_2$ e:

1. Seinään vaikuttaa kuvitteellinen mitoituksessa selville saatu vetovoima/noste, jonka suuruus on  $F_k=100 \text{ kN}=100\,000 \text{ N}$ .
2. Muunnetaan vastaamaan harjateräksen B500K ( $f_{yk}=500 \text{ N/mm}^2$ ) tarvittavaa teräspinta-alaa kaavalla  $F \text{ (N)}/f_{yk} \text{ (N/mm}^2)=A_s \text{ (mm}^2)$ . Suunnitteluarvolle ( $F_d$ ) laskettaessa tulee käyttää materiaalin osavarmuuden huomioivaa arvoa esim. harjateräkselle  $f_{yk}/\gamma_M=500 \text{ N/mm}^2/1,15=435 \text{ N/mm}^2$ .
3. Tällöin teräspinta-ala voimalle on  $F_k \text{ (N)}/f_{yk} \text{ (N/mm}^2)=100\,000 \text{ N}/(500 \text{ N/mm}^2)=200 \text{ mm}^2$ . Joka vastaisi poikkileikkauksena halkaisijaltaan noin 16 mm harjaterästä ollen pituudeltaan yksi millimetri eli poikkileikkauksessa tarvittava harjateräs pinta-ala.
4. Teräksen ominaistiheytenä voimme käyttää arvoa  $7850 \text{ kg/m}^3$ .
5. Kiloiksi muutettuna harjateräksen määrä  $(A_s \text{ (mm}^2)*1 \text{ mm})*10^{-9}*7850 \text{ kg/m}^3=(200 \text{ mm}^2*1 \text{ mm})*10^{-9}*7850 \text{ kg/m}^3=0,00157 \text{ kg}$

6. Ilmaston lämpenemispotentiaalina (hiilijalanjälkenä) tämä vastaa paikallista geneeristä OneClick LCA arvoa käytettäessä  $0,495 \text{ kg CO}_2\text{e/kg}$  tai  $3890,8 \text{ kg CO}_2\text{e/m}^3$ . Muunnetaan harjateräksen määrä CO<sub>2</sub>e muotoon eli  $\text{kg (teräs)} * \text{GWP (kg CO}_2\text{e/kg)} = 0,00157 \text{ kg} * 0,495 \text{ kg CO}_2\text{e/kg} = 0,000777 \text{ kg CO}_2\text{e}$ . Vaihtoehtoisesti muunnoksessa voidaan käyttää arvoa, joka on johdettu As arvosta ollen  $\text{As(mm}^2\text{)} * 1 \text{ mm} * \text{GWP (kg CO}_2\text{e/m}^3\text{)}$ . Kyseistä arvoa voidaan käyttää esimerkiksi FEM-ohjelmien yhteydessä teräs-pinta-alojen alustavassa arvioinnissa.
7. Haluttaessa muuntaa puristusvoimia poikkileikkaustiedoksi käytetään samaa laskentatapaa käyttäen arvona esimerkiksi betonia C25/30 (puristuskestävyys  $f_{ck} = 25 \text{ N/mm}^2$ ). Jos halutaan tehdä alustavaa karkeaa vertailua materiaalien kesken, voidaan se tehdä käyttäen yhteneviä ilmoitettuja lujuusarvoja.

Tässä vaiheessa voikin herätä kysymys miksi kuormituksia olisi tarpeen tarkastella materiaalien poikkileikkauksien kautta? Aikaisemman esimerkin mukainen hiilijalanjälkiarvo  $\text{kgCO}_2$  poikkileikkaukselle konkretisoituu selkeämmin, kun sitä voidaan verrata tässä fyysiseen kappaleen. Tällöin hiilijalanjälki voidaan ymmärtää selkeämmin esim. harjateräksenä, joka olisi 16 mm halkaisijaltaan.

Rakennushankkeen kokonaisuuden kannalta on järkevintä summata yhteen rakennukseen vaikuttavat pystykuormien resultantit (veto ja puristus eriteltynä) sekä kokonaisvaakavoimat kuormitusyhdistelmien mukaisesti käyttäen rakennuksen alustavassa mitoituksessa kohteen todellisia kuormituksia ja rakentamismääräyksiä. Tämän jälkeen rakennukseen vaikuttavat voimat voidaan muuttaa edellä mainitun menetelmän mukaisesti hiilijalanjäljeksi, joka suhteutetaan rakennuksen kaikkien kerroksien pinta-alaan. Esitetty menettelytapa on tässä vaiheessa yksinkertaisempi kuin "think thank engineering" esittämä tehokkuusluokitus ja tiedot helpommin muodostettavissa alustavasta mitoituksista myös käsinlaskentana.

## 4.8 Kantavien rakennusosien optimointi - vaakarakenne

**K**antavilla vaakarakenneilla on rakennuksessa kaksi keskeistä tehtävää kuormien siirron kannalta. Toisaalta ne välittävät tasoille kohdistuvat kuormitukset kantaville pystyrakenteille, jotka kerryttävät pystykuormia kerroksittain alemmille kantaville rakenteille. Tarkasteltaessa kantavia vaakarakenteita voidaan ne mitoittaa yhteen suuntaan tai ristiin kantavina rakenteina jännevälän suunnassa tasossa vaikuttaville pystysuuntaisille voimille (esim. hyötykuormat ja omapaino). Yhteen suuntaan kantavat rakenteet voidaan ratkaista mm. kaistamenetelmää käyttäen (yhden metrin levyisenä kaistana) tai ristiin kantavien rakenteiden osalta tarkastelemalla tasomaista rakennetta kokonaisuudessaan. Huomioitava on myös tukien sijainti sekä tukiehdot (vain päädyissä vs. kaikilla sivuilla, nivel/jäykkä/liukulaakeri). Kyseisillä menetelmillä on etenkin eroja pilari-laatta sekä useampi aukkoisissa rakenteissa, joissa ristiin kantavilla rakenteilla voidaan saavuttaa etuja mm. kenttien momenttien tasauksessa. Kyseinen ristiin kantavuus on käytössä suunnittelijan niin halutessa mm. paikallavalettujen betonirakenteiden sekä liittorakenteiden osalta.

Massiivipuurakenteiden kuten CLT osalta käytössä on yleisesti kaistamenetelmä yhteen suuntaan kantavana kaistana/palkkina, joka tarkoittaa CLT-levyn kantavan pääasiassa kuormia vain jännevälin suuntaisten pitkittäisten lamellikerrosten avulla (esim. Suomessa käytettävät mitoitusohjeet). Maailmalla on kuitenkin alettu käyttää mitoituksessa hyödyksi ristiin kantavuutta mm. CLT levyrakenteiden osalta (esim. Ruotsin CLT- käsikirjan ohje sekä proHolz Cross-Laminated Timber Structural Design Volume 2). Tällöin rakenteessa voidaan hyödyntää niin pääkantosuunta kuin toissijainen kantosuuntakin vaikuttaen siihen, että vaakarakenteen aukkoja sekä läpivientejä ei välttämättä tarvitse vahvistaa erillisellä esim. liimapuupalkilla. Ristiin kantavuus on kuitenkin riippuvainen lamellien suuntauksesta, pituussuuntaisten lamellien suhteellinen osuus pienentää kuormien jakautumiskulmaa ja poikkisuuntaiset lamellit sen sijaan suurentavat jakautumiskulmaa. Maksimina kulmien jakautumiselle voidaan pitää 45,0 astetta ja miniminä 15,0 astetta. Yleisesti voidaan olettaa CLT:llä, joka koostuu 50/50 jännevälin sekä poikittaissuunnan kuormanjakautumiskulmana 25,0 astetta. Ontelolaataston osalta käsin tehtävässä jäykistyslaskennassa kuormanjakautumiskulmana on yleisesti käytetty 26,5 asteen arvoa. FEM-mitoitusohjelmat pystyvät tekemään kuormien jakautumisen määrittämisen automaattisesti tai käyttäjän haluamalla tavalla, kunhan rakenteet ovat analyyttiseltä malliltaan oikein sekä liittymien tuki-liitossiirtymät suunniteltua toteutusta vastaavat sekä tukien jäykkyudet ja vapausasteet ovat asetettuna oikein.

Tarkasteltaessa vaakarakenteiden kykyä siirtää niille kohdistuvia vaakavoimia edelleen jäykistäville pystyrakenteille, voidaan käyttää joustavan, osittain joustavan, osittain jäykän tai jäykän tason periaatteita voimien välittämiseksi tasonsuuntaisille voimille (terasrakenteilla kaikki edellä mainitut, betonirakenteilla yleensä jäykkä, puurakenteilla mahdollisia joustava, osittain jäykkä sekä jäykkä). Jäykän tason voidaan olettaa välittävän voimia äärimmäisen jäykkänä yhtenäisenä tasona, joka siirtää voimat kokonaisuudessaan levykentässä jäykistysseinille niiden jäykkyyksien suhteessa. Joustavan välipohjan periaatteena taas on, että tason jäykkyys ei ole riittävä siirtämään vaakavoimia enempää kuin sen jänneväli on kuormituksen suunnassa. Tällöin jäykistävät seinät oletetaan sen sijaan äärimmäisen jäykkiksi ja ne saavat kuormituksia vain tasorakenteen kuormituspituuksien suhteessa. Osittain jäykällä tasolla on sen sijaan tarkasteltava kumpikin tapaus vaakavoimien välittymisen osalta sekä käytettävä sitä arvoa, joka antaa suurimman kuormituksen tarkasteltavalle jäykistysseinälle.

Puurakenteisilla rakennuksilla on etenkin vaarana, että jos tasorakenne oletetaan jäykäksi saavat pitkät seinälinjat niiden suhteellisen jäykkyyden ollessa suuri myös suurempia voimia kuin mitä vaakarakenteet pystyvät välittämään esim. tilaelementtirakenteissa. Ulkoseinärakenteet tai ulkoseinälinjalla olevat lyhyet aukkojen pielet taas saavat suhteessa pienempiä kuormituksia. Toisaalta voimien välittyminen seinärakenteille on kokonaisvaltaisempaa jäykkänä tarkasteltaessa kuin jos tarkastelu olisi tehty joustavan tason periaatteella, joka aliarvioi pitkien seinälinjojen osuuden jäykistyksessä vaakavoimille. Olisikin suositeltavaa toteuttaa tarkastelu lopullisessa mitoituksessa osittain- jäykkänä tasorakenteena ja jäykkänä luonnossuunnitteluvaiheessa. Ellei voida osoittaa rakenteen kuuluvan tietyn menetelmän piiriin, jolloin tulee muistaa jäykällä välipohjalla kiertymän aiheuttama lisävaakavoima seinien jäykkyyksien suhteessa jaettuna ja joustavalla välipohjalla oletetaan, ettei kiertymistä pääse tapahtumaan. Myös tuulivoiman tarkastelut tulee tehdä lyhyelle sekä pitkälle sivulle eri tuulensuunnista huomioiden maksimi vaakavoimat näistä yhdistelmistä.

## 4.8.1 Esimerkki välipohjan vaikutuksesta rakennekokonaisuuteen

Pystykuormien erilainen jakautuminen tasomaisilla rakennevaihtoehdoilla voi johtaa kokonaisuutena rakennusosien dimensioiden sekä hiilijalanjäljen suurenemiseen. Esimerkkinä tästä Kohti vähähiilistä rakentamista – Joensuu Wood City -projektissa tarkastelussa olleen tyyppikerrostalon suunnittelu (katso kappale: 3.2 Rakenneratkaisujen vertailu päästöjen näkökulmasta).

Rakenteiden mitoitus toteutettiin käsin laskentana kokeilemalla eri kuormanjakautumiskulmia siirrettäessä välipohjan kuormia jäykistäville seinille: (1) 45 astetta (CLT, liittolaatta, betonivälipohja), (2) 26.5 astetta (Kerto-Ripa, CLT-Ripa, CLT (kaistamitoituksena) ja ontelolaattana). Tasomainen rakenne oletetaan jäykäksi, jotta vertailu saadaan toteutettua usealle rakennevaihtoehdolle. Valinnoilla on vaikutusta niin pystykuormituksiin, vaakavoimiin kuin myös jäykistysseinien rakenteellisen toiminnan toteuttamiseen (ulkoseinälinjat ei-kantavat vs. kantavat). Tällöin voidaan jopa tulla lopputulokseen, jossa on kannattavampaa kerryttää kuormia harvemmille rakenneosille kuin lisätä jäykistäviä seinä, jolloin kuormituksia ei kohdistu sinne, minne niitä eniten tarvittaisiin. Tästä esimerkkinä se, että jäykistysseinällä ei ole riittävästi kaatavaa momenttia kumoavia pystykuormia, jonka vuoksi seinän päähän muodostuu lähes pistemäinen tukireaktio vaatien poikkileikkauksen kasvattamista tukipaineen ylittyessä. Jos seinälle olisi kerrytetty enemmän kuormituksia olisi tukireaktio ollut viivamainen sekä tasaisemmin jakaantunut johtaen pienempään poikkileikkaukseen, koska paikallista nurjahdusta/lommahdusta ei pääse syntymään todennäköisesti seinän päässä. Ensimmäisessä luonnosteluvaiheessa oletetaan väli- ja ulkoseinien olevan pääasiassa kantavia sekä osan huoneistojen sisäisistä väliseinistä toimivan myös jäykistävinä seinärakenteita.

Ensimmäisessä vaiheessa tarkastellaan yleisellä tasolla vaihtoehto, jossa olisi mahdollisimman vähän kantavia seinärakenteita, mutta jäykistys voitaisiin silti toteuttaa luotettavalla sekä rakenteellisesti turvallisella tasolla. Tällöin tarkastellaan karkeasti se kuinka paljon pystykuormia kertyisi milläkin välipohjien rakennevaihtoehdolla ja mikä olisi jäykistysseinille siirtyvä vaakavoima. Lopuksi tarkastellaan seinäkohtaisesti siihen kohdistuva vetovoima koko elementin matkalla ja tämän vaikutuksen suuruus hiilijalanjälkenä. Jäykistysseinät oletetaan laskennan yksinkertaistamiseksi olevan suorakaidepoikkileikkauksia (varmemman puolella oleva mitoitus). Jos käytettäisiin yhdistelmäpoikkileikkauksia kuten L tai T-poikkileikkauksia huomioidaan ne kummassakin mitoitus suunnassa (X/Y) jäykkyysosalta.

Tasomaisten rakenteiden osalta yhtenä toimivana keinona rakennepaksuuksien sekä poikkileikkauksien pienentämiseksi voidaan myös nähdä se, miten rakenne on ajateltu toimivaksi jännevälien sekä jatkuvuuden osalta. Yleensä välipohjat eivät saa ääniteknisistä syistä jatkoa asuinrakennuksissa jatkoa huoneistosta toiseen vaan ne ovat yksiaukkoisia rakenteita. Jos rakenne sallittaisiin toteuttaa useampi aukkoisena, voitaisiin sillä pienentää yhtenä toimenpiteenä jännevälejä sekä useamman huoneiston välisenä rakenteena edesauttaa kenttämomentin siirtoa tuelle. Vaihtoehtoisesti voidaan jännevälille sijoittaa myös kantava palkki- tai risteävä holvirakenne toimivaksi liittorakenteena vähentäen osaltaan alkuvaiheen primäärirakenteen kuormituksia.

## 4.9 Rakenteiden hiilijalanjäljenvertailu teknisten ominaisuuksien perusteella

Eri rakenneratkaisujen elinkaaren hiilijalanjäljen vertailua toteutettaessa, tulee huomioida useita materiaalin vaihtoon liittyviä tekijöitä. Teknisiltä ominaisuuksiltaan eroavia materiaaleja tai tuotteita ei tulisi verrata siten, että hyödynnetään suoraan alkuperäisen materiaalin tilavuutta, paksuutta tai pinta-ala tietoja. Suora vertailu eri materiaalien välillä vääristää tuloksia, eikä rakennuksen tai sen rakenteiden osalta saavuteta tällöin välttämättä haluttuja suoritustasoja energiatehokkuuden sekä rakenteellisen toimivuuden näkökulmasta.

## 4.10 Lämmönjohtavuus, lämmöneristävyys sekä palonkesto

Jos tuotteen lämmönjohtavuus  $\lambda_D/\lambda_U$  (W/mK) on vertailumateriaalia huonompi tai parempi tulee rakennepaksuutta päivittää esim. ulkoseinillä (US) vastaamaan vertailtavan rakenteen kokonaislämmönläpäisykertoimen U-arvoa (W/m<sup>2</sup>K). Jos tarkoituksena on parantaa vertailussa rakenteen energiatehokkuutta, tulee kasvava rakennepaksuus huomioida mm. seinärakenteiden vaipan pinta-aloissa. Kyseiset tiedot on tuotava ilmi arvioinnin raportoinnissa ja tuotteiden lämmönjohtavuudet ovat yleensä löydettävissä teknisistä tiedoista tai suoritustasoilmoituksista (DoP).

Osastoivien, kantavien sekä eristävien rakennusosien osalta tulee myös huomioida, että rakennusosa täyttää sille suunnittelussa asetetut vaatimukset kantavuuden (R), tiiviyyden (E) ja eristävyys (I) osalta. Tällöin on tunnistettava rakenneosien optimoinnissa eri rakennekerroksien sekä rakenteiden toiminnalliset vaatimukset. Vähähiilisenä toimenpiteenä voidaan pitää rakennusten osalta myös toiminnallista palomitoitusta (paloluokka rakennukselle tällöin P0), jonka avulla REI-vaatimukset voidaan mitoittaa käyttämällä taulukkomitoituksesta poiketen simulointia oletetuilla todellisilla palokuormilla.

Tällä voidaan saavuttaa osaltaan säästöjä niin materiaaleissa kuin hiilijalanjäljessäkin kun vaatimukset pintaluokille (osa pinnoista mahdollista olla puupinnalla), palonkestolle kuin suojaverhousluokillekin saadaan osittain alentumaan. Esimerkiksi RakMK EI perustuva luokkavaatimus R90 (standardipalo) voidaan saada laskemaan R60:een toiminnallisella palomitoituksella, jonka voidaan huomata alentavan myös hiilijalanjälkeä. Myöhemmin on kuvattu esimerkki (Kuvat 64–65.), jossa vaatimukset asetettu seinärakenteelle (korkeus 3 m) palonkeston osalta (REI) ja ääneneristävyydelle ei ole asetettuna vaatimuksia.

Kun rakennuksessa halutaan vaihtaa suunnitteluratkaisuissa kantavien rakenteiden materiaaleja, tulee huomioida ovatko ne palosuojattuja vai ei palosuojattuja. Jos rakenne halutaan toteuttaa palosuojaamattomana, tulee aikaisemmin mainittujen kohtien lisäksi kiinnittää huomiota erityisesti haluttuun rakenteen kantavuuteen (R) palotilanteessa.



	Thickness [mm]	Building material	Heat conductivity $\lambda$ [W/(m·K)]	Gross density $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Flammability class EN 13501-1
<b>A</b>	12.5	Rigips RF fire protection board*	0.25	800	A2
<b>B</b>	90	CLT BBS, 3-layered	0.12	450	D
<b>C</b>	12.5	Rigips RF fire protection board*	0.25	800	A2
<b>Total</b>	<b>11.50 cm</b>			<b>60.50 kg/m<sup>2</sup></b>	

Kuva 64. REI 60 rakenne (binderholz. n/d. Solid Timber Manual 2.0. IW02 d).

	Thickness [mm]	Building material	Heat conductivity $\lambda$ [W/(m·K)]	Gross density $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Flammability class EN 13501-1
<b>A</b>	15	Rigips RF fire protection board*	0.25	800	A2
<b>B</b>	100	CLT BBS, 5-layered	0.12	450	D
<b>C</b>	15	Rigips RF fire protection board*	0.25	800	A2
<b>Total</b>	<b>13 cm</b>			<b>69 kg/m<sup>2</sup></b>	

Kuva 65. REI 90 rakenne (binderholz. n/d. Solid Timber Manual 2.0. IW02 d).

Tässä tapauksessa käytämme Rigips RF 15 mm levyille ominaistiheyttä 840 kg/m<sup>3</sup>.

Hiilijalanjälkitiedot (kun ei huomioida puutuotteen hiilivarastoa tai D-vaiheen hyötyjä):

Kipsilevy Rigips RF Fireboard 12,5 mm (800 kg/m<sup>3</sup>), 176 kg CO<sub>2</sub>e/m<sup>3</sup>  
(International EPD System S-P-00784)

Kipsilevy Rigips RF Fireboard 15,0 mm (840 kg/m<sup>3</sup>), 173 kg CO<sub>2</sub>e/m<sup>3</sup>  
(International EPD System S-P-00787)

Binderholz CLT BBS (5-lamellinen) (470 kg/m<sup>3</sup>), 304 kg CO<sub>2</sub>e/m<sup>3</sup>  
(IBU EPD-BBS-20190021-IBB1-DE)

Materiaaliluettelot ja määrät:

**Vaihtoehto 1. REI60.** Kipsilevy 0,025 m<sup>3</sup> ja CLT 0,09 m<sup>3</sup>;  
Hiilijalanjälki: 0,025 m<sup>3</sup>\*176 kg CO<sub>2</sub>e /m<sup>3</sup>+0,09\*304 kg CO<sub>2</sub>e/m<sup>3</sup>=  
4,4 kg CO<sub>2</sub>e+27,36 kg CO<sub>2</sub>e=31,76 kg CO<sub>2</sub>e/m<sup>2</sup>

**Vaihtoehto 2. REI90.** Kipsilevy 0,030 m<sup>3</sup> ja CLT 0,10 m<sup>3</sup>;  
Hiilijalanjälki: 0,030 m<sup>3</sup>\*173 kg CO<sub>2</sub>e /m<sup>3</sup>+0,1\*304 kg CO<sub>2</sub>e/m<sup>3</sup>=  
5,19 kg CO<sub>2</sub>e+30,4 kg CO<sub>2</sub>e=35,59 kg CO<sub>2</sub>e/m<sup>2</sup>

Hiilijalanjäljen säästö: 35,59 kg CO<sub>2</sub>e/m<sup>2</sup>-31,76 kg CO<sub>2</sub>e/m<sup>2</sup>= 3,83 kg CO<sub>2</sub>e/m<sup>2</sup> (-11 %).

Yhteenvetona voidaankin todeta, että hiilijalanjäljen kannalta toiminnallinen palomitoitus oli kannattava ja säästöä saadaan myös materiaalien osalta.

Jos tuotteen pintaluokalle ei olisi asetettu toiminnallisia vaatimuksia voidaan tarkastella, onko järkevää poistaa palosuojalevytys ja huomioida rakenteellinen kantavuus kasvat-

tamalla CLT:n poikkileikkausta hiiltymä huomioiden REI60 paloluokassa. CLT:n hiiltymänopeus seinärakenteilla ensimmäiseen lamellin liimasaumaan  $\beta_{0,1}=0,63$  mm/min ja loput lamellikerrokset  $\beta_{0,2}=0,86$  mm/min. Binderholz BBS 90 lamellit 30-30-30 ja rakennetyypissä ilmoitettu max.kuorma  $q_{fi,d}=80$  kN/m. Kyseinen poikkileikkaus ei yksinään täytä mitoituksessa REI60 palonkestovaatimusta, mutta CLT BBS 100 5- lamellisena täyttää sen. Huomioitavaa, että palotilanteessa vaikuttaa erilainen kuormitusyhdistelmä kuin murto- tai käyttörajatilassa jolloin ei voida käyttää suoraan samoja vaikuttavia kuormia jäännös-poikkileikkauksen mitoituksessa.

CLT BBS 100 hiilijalanjälki= $0,1*304$  kg CO<sub>2</sub>e/m<sup>3</sup>=30,4 kg CO<sub>2</sub>e/ m<sup>2</sup>

Huomataan, että poikkileikkauksen kasvattaminen olisi järkevää hiilijalanjäljen näkökulmasta, koska paksumman CLT:n käyttö aiheuttaa -4% vähennyksen. Toisaalta tässä tulisi huomioida ekonomisesta näkökulmasta myös työmaalla käytettävä aika levytykseen sekä kipsilevyruuvit ym. ja CLT:n kokonaiskustannukset. Hiilijalanjäljennäkökulmasta tulee myös pohtia saavutettavia pitkäikäisiä hiilivarastoja puutuotteiden osalta.

Muiden suojaavien levytyksien osalta esimerkiksi palokipsilevyä paksuus 15 mm (pintaluokka A2-s1,d0) ei voida vaihtaa suoraan saman paksuiseen vanerilevyyn (pintaluokka D-s2,d2). Jos vaihdos tehtäisiin suoraan, eivät pintaluokan vaatimukset täytyisi ja toisaalta tuotteilla on osaltaan erilaiset palonsuojausominaisuudet (seinässä puurakenteen hiiltymisen alkamishetki palokipsilevy tch=20 min ja vanerilla hiiltymisnopeus (tiheys 450 kg/m<sup>3</sup>) tch=15 mm/ 1 (mm/min)=15 min)

Esimerkinä eristeiden osalta omakotitalon ulkoseinärakenne, jossa alustavana tavoitteena pienentää matalaenergiatalon eristemateriaalien aiheuttamaa hiilijalanjälkeä vaihtamalla FF-PIR eristetty eristekerros Paroc kivivillaan. Jos Paroc kivivillan arvona käytetään FF-PIR eristepaksuutta ei saavuteta haluttua U-arvoa rakenteelle. Tällöin on haettava rakennetyyppi tai rakennepaksuus, joka vastaa mahdollisimman hyvin haluttua U-arvoa tai vaihtoehtoisesti laskettava käsin. Tässä tapauksessa karkeasti arvioitaessa FF-PIR ( $\lambda U=0,022$  W/mK) eristeen paksuus 200 mm ja lähes vastaavan kivivillarakenteen eristeen paksuus PAROC eXtra ( $\lambda D=0,036$  W/mK) paksuus 200 mm+ PAROC Cortex Pro ( $\lambda D=0,032$  W/mK) paksuus 70 mm.

Rakenteiden hiilijalanjäljet 1 m<sup>2</sup> tarkastelualalle:

Finfoam FF-PIR GWP=198 kg CO<sub>2</sub>e /m<sup>3</sup> (RTS: RTS EPD 3)  
0,2 m (paksuus)\*1 m<sup>2</sup> (tarkastelualue)\*198 kg/m<sup>3</sup> (GWP)=39,6 kg CO<sub>2</sub>e

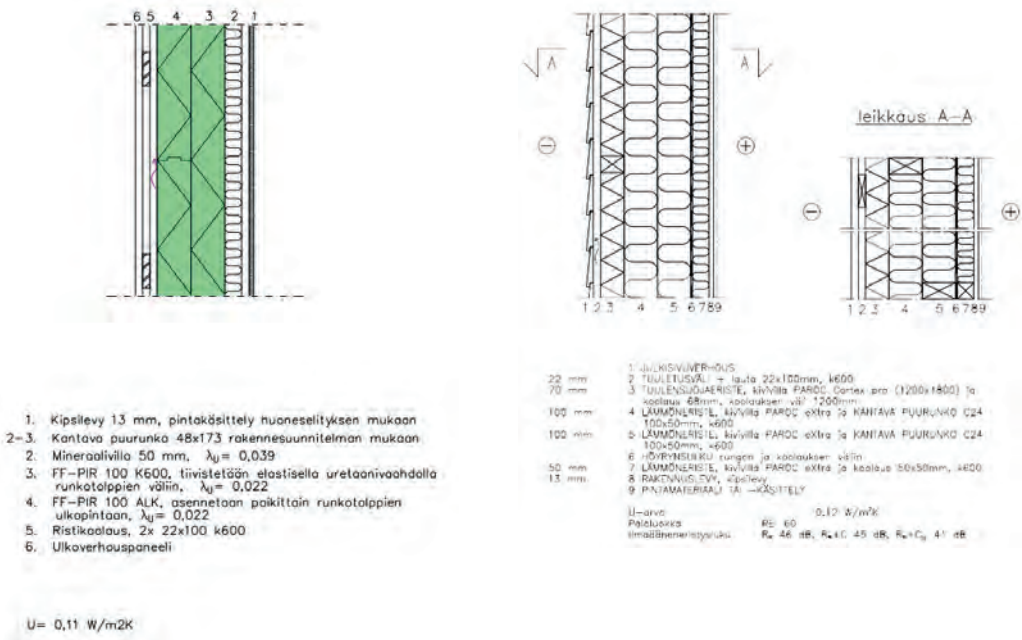
PAROC Cortex Pro ja PAROC eXtra GWP= 88.52 kg CO<sub>2</sub>e / m<sup>3</sup> (EPD Norge: NEPD00267E)  
(0,07 m(Cortex)+0,2 m (eXtra))\* 1 m<sup>2</sup> (tarkastelualue)\* 88,52 kg CO<sub>2</sub>e / m<sup>3</sup> (GWP)=  
23,9 kg CO<sub>2</sub>e

Jos laskenta olisi toteutettu ilman rakennepaksuuden huomiointia Paroc eXtra levyn osalta:  
0,2 m (paksuus)\*1 m<sup>2</sup> (tarkastelualue)\* 88,52 kg CO<sub>2</sub>e / m<sup>3</sup>=17,7 kg CO<sub>2</sub>e.

Eli tässä tapauksessa materiaalivaihdoksella tarvittiin eristekerrokseltaan paksumpi seinärakenne, joka on materiaalimääränsäyksestä huolimatta hiilijalanjäljeltään pienempi.

Toisaalta FF-PIR eristeellä saavutetaan rakennuksen osalta pienempi bruttopinta-ala sekä ulkoseinän pinta-ala. Ilman rakennepaksuuden huomiointia olisi laskennassa tullut

noin 26 % prosentoin vääristymä hiilijalanjälkeä alentavasti todelliseen U-arvoon mukaiseen arvoon verrattuna. Huomioitava kuitenkin, että PAROC ratkaisussa tulee lisäksi vielä sisäpuolinen höyrynsulku ja on kiinnitettävä kokonaisuutena huomiota mm. rakenteen vesi-höyrynvastukseen (Kuva 66.). U-arvoon vaikuttavat myös muut tekijät kuten kiinnikkeiden kylmäsilat, asennustapa sekä liittymät, jotka voi karkeassa hiilijalanjälkiverailussa jättää alkuvaiheessa huomioimatta. Rakenteen paloluokka on FF-PIR rakenteelle vaahdon osalta D-s2,d0 ja kivivilla tuulensuojaeristeellä A2-s,d0, joten palonkesto tulisi tarkistaa rakennetyypille kaikki kerrokset huomioiden. Pintamateriaalit ovat ulko- ja sisäpinnassa sen sijaan yhteneväisiä rakennetyyppien välillä.



Kuva 66. rakennetyyppien havainnekuvat: vasemmalla PIR-eristetty ratkaisu ja oikealla rankarunkoinen kivivillaeristeinen rakenne (Finnfoam 2020, Paroc n/d).

## 4.11 Raudoituksen määrärajoitus ja keskimääräiset arvot (kg/m<sup>3</sup>)

Luonnossuunnitteluvaiheessa teräsbetonirakenteiden vaikutuksia rakennuksen hiilijalanjälkeen voidaan arvioida mitoittamalla edustavimmat rakenneosat sekä laatimalla tyyppielementeistä urakkalaskennalle raamit kustannusten sekä määrien arvioimiseksi. Kyseiset tyyppielementtikuvat ovat sinällään toimivia myös alkuvaiheessa betonirakenteisten elementtirakennusten hiilijalanjälkenlaskentaa. Jos kyseisiä tietoja ei ole saatavilla tai puuttuvien lähtötietojen (mm. jännevälit, kerroskorkeus, tilojen

muuntojoustavuus, jne.) vuoksi mitoitusta ei voida vielä tehdä riittävällä tarkkuudella, voidaan käyttää kokemukseen perustuvia tietoja määrien osalta. Tällöin hiilijalanjälkilaskennassa voidaan käyttää apuna keskimääräisiä tietoja rakennusosittain sekä elementtityypeittäin rauditusmäärien arvioimiseksi, jotka voivat perustua osaltaan aikaisempiin kohteisiin tai mitoitustaulukoihin (Kuvat 67–68.).

Kyseisiä keskimääräisiä tietoja käytettäessä on kuitenkin huomioitava, että eri kohteiden välillä voi olla suuriakin eroavaisuuksia mm. kuormituksissa, jänneväleissä sekä mitoitusmenetelmissä hyödynnettäessä Suomen ulkopuolella käytettäviä keskimääräisiä arvoja esim. rauditukselle. Tämä vaikuttaa osaltaan keskimääräisten tulosten hajontaan, jolloin arvioinnissa tulisi käyttää vertailussa niin vähimmäis-, enimmäis- kuin keskiarvoonkin perustuvia tietoja arvioitaessa rakennusosien hiilijalanjäljen suuruutta.

Betonirakennusosa	Rauditusmäärä kg/m <sup>3</sup>
Kantava maanvarainen laatta/ pohjalaatta	90–130
Palkit, kevyt kuormitus	100–150
Palkit	150–300
Jatkuva paaluantura	135
Pilarit, kevyt kuormitus	110–200
Pilarit	200–450
Jatkuva antura	230–330
Pilariantura	70–100
Paaluantura	110–150
Holvi	95–135
Reunavahvistettu laatta	115
Kantava seinä	110–150
Ripalaatta	80–120
Laatta, yhteen suuntaan kantava	75–125
Laatta, kahteen suuntaan kantava	67–135
Portaat	130–170
Sidepalkki	130–170
Siirtolaatta	150
Seinä, normaali VS	70–100
Seinä, tuuli US	90–150
<b>HUOM!</b> sälle altistuvat rakenteet	Palkit +15%; Pilarit +15%; Seinät +15%
<b>Keskimääräiset arvot betorunkorakenteille</b>	
Teollisuuslaitokset = 130 kg/m <sup>3</sup>	
Kokoontumistilat = 100 kg/m <sup>3</sup>	
Opetusrakennukset = 90 kg/m <sup>3</sup>	

Kuva 67. Raudituksen arvioidut määrät Yhdistyneessä Kuningaskunnassa (YourSpreadsheets n/d).

Kohti Vähähiillistä rakentamista – Joensuu Wood City -projektin toimenpiteenä toteutettiin elinkaaren päästölaskentaa konkreettisille rakentamisen kohteille. (ks. luku 3 Rakennusratkaisujen vertailu päästöjen näkökulmasta). Alla olevassa taulukossa on kuvattu näiden kohteiden keskimääräisiä raudoitusmääriä. Raudoitusmäärien osalta varsinaiset raudoitteet (harjateräksiset ja raudoitusverkot) ja kiinnitysosat ovat eroteltu, sillä niiden poikkeavat valmistustavat vaikuttavat osaltaan tuotteiden hiilijalanjälkeen. Kiinnitysosille voidaan käyttää esimerkiksi Peikon EPD:n ja raudoituksille Celsa Steel EPD:n tietoja tai geneerisiä päästötietoja. Kierrätysaste raudoituksissa yleisesti luokkaa 90 % materiaalien osalta mm. harjateräksissä.

Betonirakennusosa tai elementti	raudoitusmäärien kuutiokohtaiset määrät 1. harjateräksset+ raudoitusverkko 2. kiinnitysosat 3. kaikki yhteensä
Alapohjat	1. 26-55 kg/ m <sup>3</sup> , keskiarvo 40 kg/m <sup>3</sup> 2. 0-4 kg/ m <sup>3</sup> 3. 26-55 kg/ m <sup>3</sup> , keskiarvo 41 kg/m <sup>3</sup>
Väli­pohjat, ontelolaataston pintavalut	1. 48-52 kg/ m <sup>3</sup> , keskiarvo 50 kg/m <sup>3</sup> 2. 0-17 kg/ m <sup>3</sup> , keskiarvo 9 kg/ m <sup>3</sup>
Väli­pohjat, ontelolaataston sauma- ja ripustusraudoitus sekä rengasraudoitus	1. 6-8 kg/ m <sup>3</sup> , keskiarvo 6 kg/m <sup>3</sup> 2. 0 kg/ m <sup>3</sup> 3. 6-8 kg/ m <sup>3</sup> , keskiarvo 6 kg/m <sup>3</sup>
Antura+anturakaulat	1. 18-37 kg/ m <sup>3</sup> , keskiarvo 26 kg/m <sup>3</sup> 2. 0-1 kg/ m <sup>3</sup> , keskiarvo 0 kg/m <sup>3</sup> 3. 18-37 kg/ m <sup>3</sup> , keskiarvo 26 kg/m <sup>3</sup>
Sokkelielementit (AN/SN), ulkokuori	1. 27-41 kg/ m <sup>3</sup> , keskiarvo 37 kg/m <sup>3</sup> 2. 0-12 kg/ m <sup>3</sup> , keskiarvo 4 kg/m <sup>3</sup> 3. 29-58 kg/ m <sup>3</sup> , keskiarvo 42 kg/ m <sup>3</sup>
Sokkelielementit (AN/SN), sisäkuori	1. 27-96 kg/ m <sup>3</sup> , keskiarvo 60 kg/ m <sup>3</sup> 2. 0-14 kg/ m <sup>3</sup> , keskiarvo 8 kg/ m <sup>3</sup> 3. 32-103 kg/ m <sup>3</sup> , keskiarvo 67 kg/ m <sup>3</sup>
US-elementti (SK), sisäkuori	1. 92-100 kg/m <sup>3</sup> , keskiarvo 96 kg/ m <sup>3</sup> 2. 6-10 kg/ m <sup>3</sup> , keskiarvo 8 kg/ m <sup>3</sup> 3. 102-106 kg/ m <sup>3</sup> , keskiarvo 104 kg/ m <sup>3</sup>
Väliseinäelementit (V)	1. 50-80 kg/ m <sup>3</sup> , keskiarvo 66 kg/ m <sup>3</sup> 2. 5-13 kg/ m <sup>3</sup> , keskiarvo 8 kg/ m <sup>3</sup> 3. 54-86 kg/ m <sup>3</sup> , keskiarvo 74 kg/ m <sup>3</sup>
Pilarit-ele (P)	1. 155-232 kg/ m <sup>3</sup> , keskiarvo 187 kg/ m <sup>3</sup> 2. 38-121 kg/ m <sup>3</sup> , keskiarvo 78 kg/ m <sup>3</sup> 3. 213-353 kg/ m <sup>3</sup> , keskiarvo 265 kg/ m <sup>3</sup>
ruutuelementti/julkisivuelementti (ei kantava) (R/RT)	1. 41-50 kg/ m <sup>3</sup> , keskiarvo 46 kg/ m <sup>3</sup> 2. 9-13 kg/ m <sup>3</sup> , keskiarvo 11 kg/ m <sup>3</sup> 3. 55-60 kg/ m <sup>3</sup> , keskiarvo 57 kg/ m <sup>3</sup>
Ruutuelementti (kantava) (S)	1. 37 kg/ m <sup>3</sup> 2. 9 kg/ m <sup>3</sup> 3. 46 kg/ m <sup>3</sup>
Sisäkuorielementti (ei kantava) (RK)	1. 58 g/ m <sup>3</sup> 2. 13 kg/ m <sup>3</sup> 3. 70 kg/ m <sup>3</sup>
Paikallavaluseinät tb (b=200 mm)	1. 69 kg/ m <sup>3</sup> 2. 0 kg/ m <sup>3</sup> 3. 69 kg/ m <sup>3</sup>
Väestönsuoja seinät (VSS)	1. 57-130 kg/ m <sup>3</sup> , keskiarvo 87 kg/ m <sup>3</sup> 2. 0 kg/m <sup>3</sup> 3. 57-130 kg/ m <sup>3</sup> , keskiarvo 87 kg/ m <sup>3</sup>
Väestönsuoja alapohja (VSS)	1. 36- 64 kg/ m <sup>3</sup> , keskiarvo 46 kg/ m <sup>3</sup> 2. 0 kg/m <sup>3</sup> 3. 36- 64 kg/ m <sup>3</sup> , keskiarvo 46 kg/ m <sup>3</sup>
Väestönsuoja holvi (VSS)	1. 64-148 kg/ m <sup>3</sup> , keskiarvo 113 kg/ m <sup>3</sup> 2. 0 kg/ m <sup>3</sup> 3. 64-148 kg/m <sup>3</sup> , keskiarvo 113 kg/ m <sup>3</sup>

Kuva 68. Kontioniemen koulun, Sivistyskeskus Majjun, Kuhmonkadun kampuksen sekä Nepenmäen koulun raudoitusmääriä perustuen RAK/ELE- suunnittelulasiakirjoihin.

# 5 Pohdinta

**K**ansallinen säädös- ja menetelmäkehitystyö rakennusten elinkaaren hiilijalanjäljen arvioimiseksi on hyvässä vauhdissa. Laskentatapa sekä menetelmät ovat tiedossa, kuten myös siihen liittyvä ohjeistus. Kuitenkin vaikein ja eniten keskustelua herättävä osuus liittyy rakennusten elinkaariarvointiin on vielä käymättä: kuka vastaa tietojen oikeellisuudesta sekä niiden tarvittavasta päivittämisestä rakennushankkeen edetessä? Kenen tehtävänä on toteuttaa arviointi ja kenellä on korvausvelvollisuus, jos sitovia raja-arvoja asetetaan? Miten nämä velvollisuudet osoitetaan mm. suunnittelun ja rakentamisen tarjouspyynnöissä sekä urakka-asiakirjoissa?

Lisäksi keskustelua hiilijalanjälkilaskijoiden keskuudessa on herättänyt se, onko tarvetta lisätä konsultteja rakentamishankkeessa nykyisten kosteudenhallintakoordinaattoreiden, turvallisuuskoordinaattoreiden ym. lukuisaan joukkoon. Konsulttien lisääminen ei ole pitkällä aikavälillä hiilijalanjäljen arvioimiseksi kestävä ratkaisu. Näin rakentamisen kustannukset eivät lisääny sekä hiilijalanjälkilaskelmat eivät jää kerran todentavan tiedon tasolle, kuten energiatodistuksen osalta on käynyt. Rakennushankkeeseen osallistuva taho, kuten suunnittelija, olisi paras vaihtoehto hiilijalanjäljen arvioimiseksi.

Elinkaaren hiilijalanjäljen arviointi lisää myös rakennusalalla toimivien henkilöiden koulutustarvetta ja aiheuttaa sitä kautta kustannuksia. Joissakin tapauksissa kouluttautuminen voidaan jopa nähdä ylimääräisenä, ei-tuottavana kulueränä. On kuitenkin huomiotava, että kyse on lopulta rakennuksen ja rakenteiden optimoinnista, joka tähtää myös kustannustehokkuuteen. Tavoitteet, kuten tuotannon aiheuttamat päästöt/tehokkaat tuotantoketjut, materiaalimäärät/kuljetukset, tekniset ominaisuudet/toimivuus, huollettavuus ja kierrätettävyyys sekä rakennuksen käyttöikä eivät kuulostakaan enää niin vierailta sanoilta. Näitä tavoitteita on pyritty pohtimaan ennenkin, ja etsitty parhaita vaihtoehtoja rakennuksen toteutuksen kannalta.

Kohti vähähiilistä rakentamista-Joensuu Wood City -projektissa toteutettujen rakennusten elinkaaren päästölaskelmien perusteella voidaan todeta, että saatavissa olevat lähtötiedot ovat merkittävin tekijä tietojen laatuun sekä laskennan toteuttamisaikaan vaikuttava tekijä. Tärkeintä hiilijalanjälkilaskennan kannalta onkin, mitä tietoja on saatavilla ja missä muodossa ne ovat. Jos suunnittelu on toteutettu pelkästään käyttämällä 2D-dokumentteja sekä asiakirjoja voi tämä lisätä työmäärää materiaali- ja määräluetteloiden kokoamisessa. Tietomalli, jota ei ole tehty johdonmukaisesti ja joka ei sisällä tarvittavia luokituksia sekä asianmukaista geometriaa on työläs muuttaa johdonmukaisesti analysoitaviksi dataksi. Tämä voidaan välttää mieltimällä tilaajan vaatimuksia laajemmasta näkökulmasta. Tällöin korostuu osaltaan YTV-tietomallinnustason nostaminen suunnittelussa vähim-

mäistasolle 3, sekä sen vaatiminen tilaajan toimesta. Hyvä tietomalli palvelee laskentaa niin kustannuksien kuin hiilijalanjäljenarvioinninkin näkökulmasta, ja toimii samalla laadunhallinnan työkaluna rakennushankkeen toteutuksen osalta.

Tämän oppaan tarkoituksena ei ole ainoastaan tuoda ilmi rakennusmateriaaleista johtuvia eroja kohteiden keskinäisessä vertailussa, vaan valottaa niitä tekijöitä, joilla hiilijalanjälkeä voidaan optimoida rakennuksen massoittelulla, rakenteellisilla ratkaisuilla sekä muuntojoustavuuden sallivilla jänneväleillä. Tässä tapauksessa muuntojoustavuus tarkoittaa käyttötarkoituksen mahdollistavaa muutosta sekä rakenneratkaisujen laajempaa kilpailuttamismahdollisuutta. Rakenneteknisistä vaikutusmahdollisuuksista mainittakoon mm. välipohjan kantosuunnat, jäykistysseinien sijoittelu sekä kuormien kerryttäminen nos-teelle alttiina oleville rakenneosille sekä käyttämällä "mix-and-match" tai hybridirakentamisen periaatetta parhaiden ratkaisujen löytämiseksi. Tarkoituksena on myös tuoda ilmi hiilijalanjäljen optimointia tekevälle suunnittelijalle se, mikä vaikutus valinnoilla on rakennukseen kokonaistasolla.

Kun halutaan tehdä kokonaisvaltaista rakenteiden optimointia hiilijalanjäljen näkökulmasta, tulisi välttää joko/tai -asettelua järjestelmien välillä. Rakenteita tulee uskaltaa yhdistää ja sallia useita näkökulmia monitavoiteoptimoinnille. Tarkastelua ei tule tehdä pelkästään niin, että vaihdetaan kaikki rakenteet joko teräkseksi, puuksi tai betoniksi. Tarkastelu on järkevintä tehdä rakennusosatasolla pilarit, palkit, välipohjat, ulkoseinät, väliseinät tai yläpohjat eriteltyinä. Jos rakennevaihtoehtoja tarkastellaan rakennusosatasolla, tulee huomioida niiden kerrannaisvaikutukset esim. matalapalkkiratkaisut vs. välipohjan alapuoliset palkkiratkaisut vaikuttaen mm. kerroskorkeuteen. Liittorakenteet, moniaukkoiset rakenteet vs. yksiaukkoiset rakenteet.

On myös muistettava, että rakenteiden optimointi hiilijalanjäljen näkökulmasta on vain yksi tekijä kokonaisuutta ajatellen. Tavoitteiden asettaminen jo rakennushankkeen alkuvaiheessa on tärkeää, jotta hiilijalanjälkilaskenta ei jää vain jälkiseurannan tasolle. Suurimmat vaikutusmahdollisuudet ovatkin hanke- ja luonnossuunnitteluvaiheessa, jolloin tilojen muuntojoustavuutta sekä rakennuksen suuria linjauksia aletaan miettimään. Materiaalin aiheuttamien päästöjen lisäksi tulee ymmärtää myös kuljetuksesta, huollosta ja elinkaaren lopusta tulevat päästöt. Rakennuksien osalta suurin hiilijalanjälki muodostuu käyttövaiheessa energiankulutuksessa ja tähän vaikuttavat niin energiatehokkuus, rakennuksen vaipan aukotus, sijainti, sijoittuminen ilmansuuntiin nähden sekä talotekniikan ratkaisut. Kokonaisuuden tarkastelu on ensisijaisen tärkeää ja johtaa lopulta parhaimpaan lopputulokseen.



# Lähteet

binderholz. n/d. Solid Timber Manual 2.0. IW02 d.

<https://www.massivholzhandbuch.com/fileadmin/holzbau/handbuch/en/IW02c.pdf>

binderholz. n/d. Solid Timber Manual 2.0. IW02 d.

<https://www.massivholzhandbuch.com/fileadmin/holzbau/handbuch/en/IW02d.pdf>

Bionova Oy. 2017. Tiekartta rakennuksen elinkaaren hiilijalanjäljen huomioimiseksi rakentamisen ohjauksessa.

CEN ISO/TS 14071. 2016. Environmental management. Life cycle assessment. Critical review processes and reviewer competencies: additional requirements and guidelines to iso 14044:2006 (iso/ts 14071:2014). Helsinki: Suomen Standardoimisliitto SFS.

EeBGuide. 2012. Operational guidance for life cycle assessment studies of the Energy-Efficient Buildings Initiative. Part B: Buildings. <https://www.eebguide.eu/>

Euroopan komissio: Level(s), European framework for sustainable buildings.

<https://ec.europa.eu/environment/eusssd/buildings.htm>

European Commission. 2011. COM(2011) 112 final A Roadmap for moving to a competitive low carbon economy in 2050. Brussels.

[https://www.eea.europa.eu/ds\\_resolveuid/2c96a255-f861-4bfd-9ba0-1227fed56fc7](https://www.eea.europa.eu/ds_resolveuid/2c96a255-f861-4bfd-9ba0-1227fed56fc7)

European Commission. Joint Research Centre. 2012. Product Environmental Footprint (PEF) Guide. Italy.

<http://ec.europa.eu/environment/archives/eusssd/pdf/footprint/PEF%20methodology%20final%20draft.pdf>

Finfoam. 2020.

[https://www.finfoam.fi/files/rakennekuvat/ff-pir/2020/FF-PIR\\_US05\\_puurunko\\_2020\\_fi.pdf](https://www.finfoam.fi/files/rakennekuvat/ff-pir/2020/FF-PIR_US05_puurunko_2020_fi.pdf)

Green Building Council Finland: vähähiilisyiden sanakirja - vähähiilisen rakentamisen ja kiinteistöliiketoiminnan terminologia. <https://figbc.fi/wp-content/uploads/sites/4/2020/05/GBC-V%C3%A4h%C3%A4hiilisyiden-sanakirja-27.5.2020.pdf>. 23.11.2020

Joensuun kaupunki. Tekninen virasto. 2008. Penttilänrannan hankesuunnitelma.

<https://www.joensuu.fi/documents/144181/4291773/Penttil%C3%A4nrannan+hankesuunnitelma.pdf/166d0fba-6409-8d89-860f-a93677aee811>

Kangas, H. ym. 2019. Taloudellisten kannusteiden käyttö vähähiilisen rakentamisen ohjauksessa : TALO-hankkeen loppuraportti. Ympäristöministeriön julkaisuja 2019:32. Saatavilla:

<https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/handle/10024/161923>

Keskinen, M. 2019. Elinkaariarviointin (LCA) tulokset, Kontioniemen koulu. Karelia-ammattikorkeakoulu: Kohti vähähiilistä rakentamista -projekti.

Lappalainen, Markku: Energia- ja ekologiakäsikirja. Suunnittelu ja rakentaminen.

Helsinki: Rakennustieto. 2010.

Lylykangas, K., Andersson, A., Kiuru, J., Nieminen, J. & Pääntalo, J. 2015. Rakenteellinen energiatehokkuus:

Opas 2015. Helsinki: Ympäristöministeriö.

Mena, Q. 2020a. Towards a structural efficiency classification system. Structures 26, 298–310.

<https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.04.012>

Mena, Q. 2020b. Best-to-Knowledge building structure theoretical near-optimum function. Spain. Saatavilla: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.20170.31688>

Moisio, M., Kaasalainen, T., Lehtinen, T., & Hedman, M. (2018). Energiatehokkaan arkkitehtisuunnittelun ohjekortisto. (Tampereen teknillinen yliopisto. Arkkitehtuurin laboratorio. Asuntosuunnittelu. Julkaisu; Vuosikerta 32). Tampereen teknillinen yliopisto. Arkkitehtuurin laboratorio.

N. Dodd, M. Cordella, ja S. Donatello. 2020. Level(s) indicator 1.1: Use stage energy performance, User manual: overview, instructions and guidance (Publication version 1.0). European Commission, Joint Research Centre. [https://susproc.jrc.ec.europa.eu/product-bureau/sites/default/files/2020-10/20201013%20New%20Level\(s\)%20documentation\\_Indicator%201.1\\_Publication%20v1.0.pdf](https://susproc.jrc.ec.europa.eu/product-bureau/sites/default/files/2020-10/20201013%20New%20Level(s)%20documentation_Indicator%201.1_Publication%20v1.0.pdf)

N. Dodd, M. Cordella, M. Traverso ja S. Donatello. 2017. Level(s) – A common EU framework of core sustainability indicators for office and residential buildings. Joint Research Centre, European Commission.

Paroc. n/d. <https://www.paroc.com/spps/structure-selector/paroc/Index.html>

RTS EPD. 2020a. No. 10. Deltabeam.

RTS EPD. 2020b. No.RTS\_62\_20. DELTABEAM® Green, Unpainted.

RTS EPD. 2020c. No. RTS\_61\_20. DELTABEAM® Green, Painted.

RTS EPD. 2020d. No.RTS\_63\_20. DELTABEAM® Green, Galvanized.

SFS-EN ISO 14040. 2006. Ympäristöasioiden hallinta. Elinkaariarviointi. Periaatteet ja pääpiirteet. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto SFS.

think thank engineering. n/d. Structural Efficiency Classification System S.E.C.S. <https://thinktankengineering.co.uk/SECS.html>

Ympäristöministeriö 2020: Vähähiilisen rakentamisen tiekartta. <https://ym.fi/vahahiilisen-rakentamisen-tiekartta>

Ympäristöministeriö. 2017. Vihreä julkinen rakentaminen, hankintaopas. Ympäristöministeriön julkaisuja, Helsinki. [https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/80653/YO\\_2017\\_Vihrea\\_julkinen\\_rakentaminen\\_hankintaopas.pdf](https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/80653/YO_2017_Vihrea_julkinen_rakentaminen_hankintaopas.pdf)

Ympäristöministeriö. 2017. Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen energiatehokkuudesta. Helsinki: Ympäristöministeriö ja Suomen säädöskokoelma. 1010/2017

Ympäristöministeriö. 2019. Rakennuksen vähähiilisyyden arviointimenetelmä. Ympäristöministeriön julkaisuja 2019:22, Helsinki. <http://julkaisut.valtioneuvosto.fi/handle/10024/161761>

YourSpreadsheets. n/d. <https://www.yourspreadsheets.co.uk/reinforcement-estimates.html>



Tämä opas tarjoaa esimerkkejä ja näkökulmia maankäytön-suunnittelijoille, rakennuttajille, suunnittelijoille sekä rakentajille siitä, miten vähähiilistä rakentamista voidaan konkreettisenä edistää. Oppaaseen on koottu Karelia-ammattikorkeakoulun Kohti vähähiilistä rakentamista – Joensuu Wood City -projektin kokemuksia, tunnistettuja hyviä käytänteitä sekä kehitettyjä työkaluja.

Rakennusten elinkaaren hiilijalanjäljen kannalta merkittävimmät tekijät rakennusmateriaalien valmistuksen päästöt ja rakennuksen käytönaikainen energiankulutus. Tässä oppaassa keskitytään erityisesti rakenneteknisiin näkökulmiin rakennusten elinkaaren päästöjen vähentämiseksi.

## **Karelia-ammattikorkeakoulun julkaisuja B:67**

ISBN 978-952-275-317-5 (painettu)

ISBN 978-952-275-318-2 (verkojulkaisu)

ISSN- L 2323-6876

ISSN 2323-6876