

Sonja Laasonen

HIILIJALANJÄLJEN VERTAILU ERI RA- KENNUSMATERIAALEILLA

Hiilijalanjälki puu-, betoni- ja teräspalkille

Kandidaatintutkielma
Rakennetun ympäristön tiedekunta
01/2021

TIIVISTELMÄ

Sonja Laasonen: Hiilijalanjäljen vertailu eri rakennusmateriaaleilla
(Differences in carbon footprint for different building materials)

Kandidaatin työ

Tampereen yliopisto

Rakennustekniikan kandidaatin tutkinto-ohjelma

Tammikuu 2021

Tässä tutkimuksessa vertaillaan kolmea eri rakennusmateriaalia; puuta, betonia ja terästä. Tutkimuksen idea lähti Ympäristöministeriön uudesta julkaisusta hiilijalanjäljen seurantaan rakennusalalla. Vertailu tapahtuu mitoittamalla jokaiselle rakennusmateriaalille välipohjapalkki sopivin ominaiskuormin ja samalla jänneväkillä sekä hyötykuormalla. Tämän jälkeen vertaillaan palkin massan kulutusta, hintaa ja hiilijalanjäljen määrää. Hiilijalanjälki pohjautuu kasvihuonekaasupäästöihin ja –poistumiin, mikä saadaan määritettyä esimerkiksi One Click LCA Planetary Finland (2020) ohjelman avulla. Ohjelmasta saatu tulos on hiilidioksidiekvivalentti, jolla verrataan kasvihuonekaasupäästöjä hiilidioksidin säteilypakotteena, jonka yksikkö on W/m^2 . Hiilijalanjäljen vertailu on tässä tutkimuksessa rajattu vain rakennusmateriaalien tuottamiin päästöihin materiaalin valmistuksessa, eli rakennusmateriaalin toimitusta työmaalle ei oteta enää huomioon.

Mitoituksessa Kerto-S valmisteinen puupalkki on kevyin, halvin ja vähiten päästöjä tuottava vaihtoehto. Betonipalkin raaka-aineeksi valittiin C30/37, ja se on vaihtoehtoista painavin. IPE160 profiililtaan oleva teräspalkki on vaihtoehtoista kallein ja tuottaa eniten päästöjä. Suurta eroa betoni- ja teräspalkin päästöjen tuotossa ei synny.

Tutkimuksen puutteisiin kuuluu palkkien hinta-arviointi, joka tuodaan vain yleisellä tasolla esille. Myöskään materiaaleja ei pystytä täysin vertaamaan keskenään, sillä betoni vaatii raudituksen, joka vaikuttaa betonipalkin päästöihin noin 25 %. Toisaalta rauditus on palkin toimivuuden kannalta välttämätön. Tutkimus ei ota kantaa isompaan kokonaisuuteen, sillä rakennusmateriaalin valinta vaikuttaa paljon esimerkiksi liitostyyppeihin, mikä voisi tuoda oman muutoksen vertailuun.

Hiilijalanjäljen seuranta rakennusalalla saattaa lisätä puurakentamista. Betoni on yleensä halvin raaka-aine, joten se oletettavasti pysyy rakennusalalla. Syytä onkin toivoa, että betonimassan valmistuksessa pystyttäisiin käyttämään enemmän kierrätettyä aineista tai jollain muulla tavalla tehdä rakennusmateriaalista ympäristöystävällisempi.

Avainsanat: Hiilijalanjälki, hiilijalanjälkilaskenta, rakennusmateriaali, puu, betoni, teräs

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. PALKIN MITOITUS ERI RAKENNUSMATERIAALEILLA	3
2.1 Puupalkki	3
2.2 Betonipalkki	5
2.3 Teräspalkki	7
3. HIILIJALANJÄLJEN LASKENTA ERI PALKEILLE	11
3.1 Hiilijalanjäljen laskennan taustatieto	11
3.2 Hiilijalanjäljen laskenta jokaiselle palkille	12
4. PUUN, BETONIN JA TERÄKSEN EROT	14
5. PÄÄTELMÄT	16
LÄHTEET	17

LYHENTEET JA MERKINNÄT

Hiilijalanjälki Hiilijalanjälki on tuotejärjestelmän kasvihuonekaasupäästöjen ja -poistumien summa, jonka yksikkö on hiilidioksidiekvivalenttina (EN ISO 14067 2018).

kg CO₂e Hiilijalanjäljen laskennassa käytettävä yksikkö, jossa muiden kasvihuonekaasujen päästöjä ovat muutettu vastamaan hiilidioksidipäästöjä kiloina (EN ISO 14067 2018).

Säteilypakote Yksikkö, jolla kuvataan energiaepätasapainoa, eli ihmisten aiheuttamien päästöjen muutos energian poistumiseen ja pääsyyn maapalolle (Ilmasto-opas.fi).

<i>a</i>	<i>putoamiskiihtyvyy</i> s
<i>A_{s,i}</i>	<i>teräsraudoitteen poikkipinta-ala</i>
<i>A_t</i>	<i>teräsprofiilin poikkipinta-ala</i>
<i>b</i>	<i>palkin leveys</i>
<i>d</i>	<i>tehollinen korkeus</i>
<i>E</i>	<i>kimmomoduuli</i>
<i>f_{id}</i>	<i>materiaalista riippuva mitoituslujuus</i>
<i>f_{ik}</i>	<i>materiaalin ominaislujuus</i>
<i>f_y</i>	<i>murtolujuus</i>
<i>g</i>	<i>pysyvä kuorma</i>
<i>h</i>	<i>palkin korkeus</i>
<i>I</i>	<i>neliömomentti</i>
<i>k₁</i>	<i>kerroin betonin halkeilulle</i>
<i>k_{def}</i>	<i>materiaalin virumaluku</i>
<i>k_{mod}</i>	<i>muunnoskerroin</i>
<i>L</i>	<i>jänneväli</i>
<i>l₀</i>	<i>momentin nollakohtien väli</i>
<i>m</i>	<i>massa</i>
<i>m_f</i>	<i>pituusmassa</i>
<i>M</i>	<i>momentti</i>
<i>n</i>	<i>kappalemäärä</i>
<i>q</i>	<i>hyötykuorma</i>
<i>R</i>	<i>tukivoima</i>
<i>s</i>	<i>terästen jakoväli</i>
<i>V</i>	<i>leikkausvoima</i>
<i>w</i>	<i>taipuma</i>
<i>V_{palkki}</i>	<i>tilavuus</i>
<i>V_{Rd}</i>	<i>leikkauskestävyys</i>
<i>z</i>	<i>momenttivarsi</i>
<i>φ</i>	<i>teräksen halkaisija</i>
<i>τ</i>	<i>taivutusjännitys</i>
<i>β</i>	<i>puristuspinnan suhteellinen korkeus</i>
<i>μ</i>	<i>suhteellinen taivutusmomentti</i>
<i>ρ</i>	<i>geometrinen raudoituksen suhde</i>
<i>ρ_m</i>	<i>materiaalin ominaistiheys</i>
<i>σ</i>	<i>puristusjännitys</i>
<i>σ_{cp}</i>	<i>betonin paikallinen mitoituslujuus</i>
<i>ε</i>	<i>apusuure</i>
<i>γ</i>	<i>materiaalin osavarmuusluku</i>

1. JOHDANTO

Ympäristöystävällisyys ja ilmastonmuutos ovat olleet suuria puheenaiheita viime vuosina. Nyt rakennusalallakin on kiinnitetty tähän huomiota, sillä ympäristöministeriö on julkaissut arviointimenetelmän rakennusten vähähiilisuudelle 30.8.2019 (Ympäristöministeriö 2019a). Arviointimenetelmä on tällä hetkellä koekäytössä, jotta myöhemmin vähähiilisempi rakentaminen olisi arkipäiväisempää. Tämän tutkimuksen tarkoitus on näyttää, miten vähähiilisempi ajattelu voi vaikuttaa rakennusalalla rakennusmateriaalien valinnassa.

Aiheena hiilijalanjäljen seuranta rakennusalalla on uusi, mutta aiheesta on ehditty tehdä useampi opinnäytetyö ja muutama kandidaatintyö. Eerolan (2020) opinnäytetyö Ympäristöministeriön vähähiilisen rakentamisen ohjeen vaikutus rakennesuunnitteluun käsittelee hiilijalanjäljen määrää hallirakennukselle ottaen huomioon muutkin tekijät kuin rakennusmateriaalin. Tutkimuksessa todetaan rakennusmateriaalilla olevan suuri vaikutus hiilijalanjälkeen, mistä teräs tuottaa suhteellisesti suurimman hiilijalanjäljen. Tutkimuksessa käsitellään tarkemmin, miten ympäristöministeriön suositukset eroavat EN15978-laskentametodin laskelmista. Virolaisen (2020) opinnäytetyö Rakennuksen hiilijalanjälkeen vaikuttavat materiaalivalinnat on tehty tapaustutkimuksen kautta, jossa hyödynnettiin ympäristöministeriön ja Green Building Council Finlandian julkaisuja hiilijalanjäljen arvioinnista. Tutkimuksen tuloksena todettiin suunnitteluvaiheessa valittavien materiaalien vaikuttavan merkittävästi rakennuksen hiilijalanjälkeen. Muissa aiheita käsittelevissä opinnäytteissä tutkitaan hiilijalanjälkeä yksityiskohtaisemmissa tapauksissa.

Tämä tutkimus käsittelee puun, betonin ja teräksen eroja rakennusmateriaaleina ottaen hiilijalanjäljen huomioon. Rakennusmateriaaleja vertailussa käytetään työssä mitoitettua pakkia. Mitoitus tehdään euronormien mukaisesti. Palkkien kuormitus ja jänneväli määräytyy asuinrakennuksille sopivan kokoisista suureista. Hinnan vertailussa hyödynnetään rakennusteollisuudesta saatuja tietoja ja palkin massat saadaan tiedettyjen materiaaliominaisuuksien avulla. Hiilijalanjälkeä vertaillaan Bionovan ohjelman One Click LCA:n (2015) avulla. Tutkimuksessa käsitellään ainoastaan materiaalin hiilijalanjälkeä kolmelle eri rakennusmateriaalista tehdylle palkille.

Palkkeja vertaillaan materiaalin määrän kulutuksen ja hiilijalanjäljen perusteella sekä tuodaan esille eri materiaalien hintaeroja. Rakennusteollisuudella voi olla monia tapoja

tuottaa vähähiilisempiä rakennuksia, mutta tässä tutkimuksessa käsitellään ainoastaan, miten vähähiilisempi rakennusmateriaali voi vaikuttaa rakennusmateriaalin kulutukseen ja valintaan. Eli työssä ei tuoda esille rakennusmateriaaleille ominaisia muita rakenneratkaisuja, joilla voi olla vaikutusta hiilijalanjälkeen, esimerkiksi akustiset ratkaisut. Lopuksi tutkimuksessa kootaan päätelmät yhteen.

Toisessa luvussa tehdään esimerkkilaskenta jokaisen palkin koosta. Kolmannessa luvussa esitetään hiilijalanjäljen laskennan perusteita ja kerrotaan hiilidioksidiekvivalentin määrä jokaiselle palkille. Neljännessä luvussa kootaan eri rakennusmateriaalin erot yhteen edellisten lukujen tulosten perusteella. Viimeisessä luvussa tiivistetään työn aihe ja kerrotaan tuloksien perusteella mahdollisia päätelmiä.

2. PALKIN MITOITUS ERI RAKENNUSMATERIAALEILLA

Seuraavaksi esitetään puu-, betoni- ja teräspalkeille esimerkkilaskelmat mitoitukselta. Palkit on tarkoitus mitoittaa kestämään sama kuorma yhtä suurella jännevälillä, jolloin eri palkeilla on suurusluokaltaan sama käyttöaste. Tällä mitoituksella voidaan sijoittaa eri palkki samaan paikkaan, ja jokainen palkki täyttää rakennusmääräykset. Sovitaan jännevälin L suuruudeksi 4 000 mm ja hyötykuorman suurus q_b on 2 000 N/m², joka on esitetty välipohjan hyötykuormaksi SFS-EN 1992-1-1 + A1 + AC (2015) ja Eurokoodi 5 (2018). Hyötykuorma kerrotaan palkkien jakovälillä, joka sovitetaan yhdeksi metriksi. Näin hyötykuorman suuruudeksi saadaan $q = 2 000$ N/m. Palkeille määritetään standardien mukaan sopiva pysyväkuorma käytetyn rakennusmateriaalin mukaan. Pysyvä kuorma voi olla esimerkiksi lattian omapaino. Muita mahdollisia elementtejä välipohjan päällä ei huomioida pysyvässä kuormassa.

2.1 Puupalkki

Puun materiaaliksi valittiin kertopuu hyvän taivutuskestävyytensä ansiosta. Materiaalille Kerto-S taivutus syryllä $f_{m,k}$ on 44 MPa, ominaistiheys on 480 kg/m³, kimmomoduuli E on 13 800 MPa sekä osavarmuusluku Y_M on 1,2 ja pysyvän kuorman g määrä on 800 N/m (Eurokoodi 5 2018).

Alussa on arveltava palkin koko ja muutettava sitä laskujen mukaan. Testailu jätetään laskuihin ja tässä esitetään toimiva ratkaisu. Palkin poikkileikkauksen mitat ovat korkeus $h = 260$ mm ja leveys $b = 57$ mm, jolloin palkin oma paino lasketaan kaavalla

$$m_{palkki} = \rho_m \cdot V_{palkki}$$

$$g_{palkki} = a \cdot m_{palkki} \cdot 3.2$$

Salmen ja Pajusen (2004) mukaan saadaan johdettua yksiaukkoiselle palkille kaavat maksimi tukireaktioille ja momentille seuraavasti:

$$R = \frac{(\sum_i^n g_i + \sum_i^n q_i) \cdot L}{2}, \quad 3.3$$

$$M = \frac{(\sum_i^n g_i + \sum_i^n q_i) \cdot L^2}{8}. \quad 3.4$$

Mitoittaessa lasketaan vähintään kaksi tapausta, joista toinen on pysyvien kuormien vaikutus ja toinen pysyvän ja hyötykuorman vaikutus. Ensimmäisessä tapauksessa epäedullisessa tilanteessa käytetään kuormien kertoimena 1,35 ja toisessa tapauksessa pysyvien kuormien kertoimena 1,15 ja hyötykuormien kertoimena 1,5. Laskenta suoritetaan PTC Mathcad Prime 5.0.0.0 –ohjelmalla, joten kuormien kertoimia ei kaavoissa esitetä. Yksiaukkoiselle palkille leikkausvoima V on yhtä suuri kuin tukireaktio R .

Tämän jälkeen tarkistetaan, täyttääkö palkki suunnitteluohjeiden vaatimukset. Eurokoodi 5:n (2010) mukaan on esitetty julkaisussa EC5 Sovelluslaskelmat Asuinrakennuksille laskelmat palkin kestävyydelle. Materiaalin kestävyys lasketaan seuraavalla kaavalla:

$$f_{id} = \frac{f_{ik} \cdot k_{mod}}{\gamma_M}, \quad 3.5$$

jossa k_{mod} aikaluokasta riippuva muunnoskerroin. Kaavassa (3.5) materiaalin lujuudelle f_k sijoitetaan tapausta vastaava taulukkoarvo. Palkin taivutusjännitys lasketaan seuraavasti:

$$\sigma = \frac{6 \cdot M}{b \cdot h^2}, \quad 3.6$$

jolloin mitoitus ehdoksi taivutusjännitykselle saadaan $\sigma \leq f_{m,d}$. Tällöin pysyvien kuormien käyttöaste on valitulle materiaalille 16 % ja kaikille kuormille 43 %. Seuraavaksi lasketaan leikkausjännitys kaavalla

$$\tau = \frac{3 \cdot V}{2 \cdot b \cdot h}, \quad 3.7$$

jolloin mitoitus ehdoksi saadaan leikkausjännitykselle vastaavasti $\tau \leq f_{v,d}$. Tällöin pysyvien kuormien käyttöaste on 12 % ja kaikille kuormille 40%. Seuraavaksi lasketaan taipuman arvot pysyvälle ja hetkelliselle taipumalle seuraavasti:

$$w_{inst} = \frac{5 \cdot s \cdot g \cdot L^4}{384 \cdot E \cdot I}, \quad 3.8$$

jossa pysyvän kuorman g paikalle sijoitetaan q -arvo hetkellisiä kuormia laskettaessa ja s on palkkien jakoväli. Palkin jäyhyysmomentti on I eli tässä tapauksessa neliömomentti. Hetkellisten taipumien summaa käytetään mitoitus ehdossa, joka on $w_{int} \leq L/400$. Hetkellisen taipuman käyttöaste on 83 %. Lopuksi lasketaan lopputaipuma seuraavasti:

$$w_{fin} = [(1 + k_{def}) \cdot w_{inst,G} + (1 + 0.3 \cdot k_{def}) \cdot w_{inst,Q}], \quad 3.9$$

jossa k_{def} on materiaalin virumaluku. Lopputaipuman mitoitus ehto on $w_{fin} \leq L/300$. Lopullisen taipuman käyttöaste 81 %. Laskelmien jälkeen voidaan todeta, että Kerto-S:n so-piva koko on korkeudeltaan 260 mm ja leveydeltään 57 mm. (SFS-EN 1995-1-1 2014)

2.2 Betonipalkki

Betonipalkissa on käytettävä raudoitusta, joka on mitoitettu tässä työssä ja otettu huomioon muissa vertailuissa. Pyritään kuitenkin löytämään järkevällä ratkaisulla tehty palkki, jotta se ei vaikuta myöhempään tuloksiin turhan vääristävästi.

Laskennassa käytetään samaa hyötykuormaa ja jänneväliä kuin puupalkissakin. Betonin tilavuuspainoa ja metrin jänneväliä hyödyntäen pysyvän kuorman g arvoksi saadaan 10 000 N/m. Näiden pohjalta arvioidaan betonipalkin korkeudeksi 220 mm ja leveydeksi 150 mm ja teräksen paksuudeksi 8 mm. Valitaan yleisesti käytetty betoni C30/37 ja teräksiksi B500B. Materiaaleista voidaan tulkita, että betonin lieriötilavuus f_{ck} on 30 MPa ja teräksen myötölujuuden nimellisarvo f_{yk} on 500 MPa. Betonin osavarmuusluku on 1.5 ja teräksen 1.15 (SFS-EN 1992-1-1 + A1 + AC 2015). Normaalipainoisen raudoitetun betonin tilavuuspaino on 25 kN/m³ (SFS-EN 1991-1-1 + AC 2018). Oletetaan, että betonipalkin päällä on 200 mm paksu betonilattia.

Palkin oman paino, maksimi leikkausvoima ja taivutusvoima saadaan laskettua kaavoista (3.1, 3.2, 3.3 ja 3.4). SFS-EN 1992-1-1 + A1 + AC (2015) julkaisussa esitetään seuraavat kaavat betonirakenteiden suunnittelulle. Ensiksi lasketaan tehollinen korkeus arvioidun teräspaksuuden perusteella:

$$d = h - \phi. \quad 3.10$$

Leikkausrasitus ja taivutusmomentti saadaan kaavoista (3.3 ja 3.4). Momenttien nollakohdat ovat yksiaukkoisella palkilla palkkien päässä, joten niiden väli on l_0 on yhtä suuri kuin palkin jänneväli L . Tuentatavasta riippuen palkki on jonkun rakenteen päällä, mikä pienentäisi väliä. Mutta työssä tarkastellaan vain palkkia, joten oletettua lattiakaan ei huomioida palkin päällä. Suhteellinen taivutusmomentti saadaan seuraavasti:

$$\mu = \frac{M}{b \cdot d^2 \cdot f_{cd}} \leq 0,358, \quad 3.11$$

jossa lujuus f_{cd} lasketaan kaavalla (3.5), mutta k_{mood} tilalle vaihdetaan SFS-EN 1992-1-1 + A1 + AC (2015) mukaan betonin puristuslujuuteen vaikuttavien pitkäaikaistekijöiden ja kuormien vaikuttamistavasta aiheutuvien epäedullisten tekijöiden kerroin α_{cc} , joka on betonin kohdalla 0.85 ja teräksen ominaisuuksia laskettaessa 1. Suhteellisen taivutusmomentin raja-arvo täyttyy 94 %:sti. Suhteellisesta taivutusmomentista saadaan puristus-pinnan suhteellinen korkeus seuraavasti:

$$\beta = 1 - \sqrt{1 - 2 \cdot \mu}. \quad 3.12$$

Suhteellinen taivutusmomentin kautta voidaan arvioida betonin käyttöastetta. Oletettaessa voimien jakautuvan tasaisesti betonille ja teräksille mitoitetaan raudoitus samaan

käyttöasteeseen kuin muutkin palkit. Puristuspuunnan suhteellista korkeutta käytetään sisäisen momenttivarren laskennassa seuraavasti:

$$z = d \cdot (1 - \beta/2). \quad 3.13$$

Sisäistä momenttivartta käytetään pääraudoituksen, joka mitoitetaan mahdollisimman laskennassa seuraavasti:

$$A_s = \frac{M}{z \cdot f_{yd}}, \quad 3.14$$

jossa lujuus f_{yd} saadaan kaavalla (3.5). Raudoituksen minipinta-alasta saadaan laskettua raudoituksen koko ja määrä, 4 kappaletta teräksiä koolla 12 mm. (SFS-EN 1992-1-1 + A1 + AC 2015) Tällöin teräksen pinta-ala lasketaan Seppäsen et. al. (2013) mukaan seuraavasti:

$$A_{s,rauta} = n \cdot \pi \cdot \left(\frac{\phi}{2}\right)^2. \quad 3.15$$

Raudoituksen käyttöaste on 91%, joka on samaa käyttöastetta kuin puupalkillakin. Oletetaan pääraudoituksen jatkuvan koko palkin mitalla, joten seuraavaksi selvitetään leikkauskestävyys, jotta saadaan selville, tarvitseeko palkki leikkausraudoitusta. Leikkauskestävyyden mitoitusarvo SFS-EN 1992-1-1 + A1 + AC (2015) mukaan seuraavalla kaavalla:

$$V_{Rd} = \left[C_{Rd,c} \cdot k(100 \cdot \rho \cdot f_{ck})^{\frac{1}{3}} + k_1 \cdot \sigma_{cp} \right] \cdot b \cdot d, \quad 3.16$$

jossa suure $C_{Rd,c} = 0,18/\gamma$. Betonin paikallinen mitoituslujuus σ_{cp} oletetaan nolaksi, koska k_1 on kerroin betonin halkeilulle. Lujuuden arvo f_{ck} on 30 MPa ja k lasketaan kaavalla:

$$k = 1 + \sqrt{200/d} \leq 2,0, \quad 3.17$$

jolloin k :n raja-arvo täyttyy 99%:sti. Geometrinen raudan suhde ρ vaikuttaa teräksen kokoon seuraavasti:

$$\rho = \frac{A_{s,rauta}}{b \cdot d}. \quad 3.18$$

Jos leikkauskestävyyden mitoitusarvo on pienempi kuin tuleva leikkausrasitus, tarvitaan leikkausraudoitus. Seuraavaksi selvitetään leikkausrakenteen leikkauskestävyys laske-
malla betonin puristuskestävyys seuraavalla kaavalla:

$$V_{Rd,max} = \frac{\alpha_w \cdot b \cdot z \cdot u_1 \cdot f_{cd}}{\cot \theta + \tan \theta}, \quad 3.19$$

jossa θ on puristussauvan kulman. Kulma valitaan tapauskohtaisesti olosuhteiden mukaan. Tässä työssä valittiin yleisesti käytetty arvo 45° . Jännittämättömissä rakenteissa α_w arvo on 1. Jos leikkausraudoituksen mitoitusjännitys f_{ywd} on alle 80 % myötölujuuden ominaisarvosta f_{yk} , voidaan lujuuden pienennyskertoimelle u_1 käyttää arvoa 0,6, kun f_{ck} on pienempi tai yhtä suuri kuin 60 MPa. Betonin puristuskestävyyden pitää olla isompi kuin leikkausrasitus. Seuraavaksi lasketaan leikkausraudoitus seuraavalla kaavalla:

$$\frac{A_{sv}}{s} = \frac{V_{Ed}}{z \cdot f_{ywd} \cdot \cot \theta} \quad 3.20$$

jossa s on teräshakojen jakoväli. Tämän jälkeen mitoitetaan terästen kooksi 12 mm ja jakoväliksi k 150 mm metrin mitalle kaavalla (3.15). (SFS-EN 1992-1-1 + A1 + AC 2015) Maksimirasitus ei kata koko palkin mittaa, joten voidaan määrittää minimileikkausraudoitus kevyemmin rasitetuille kohdille. Näin säästyy materiaalia ja rahaa. Minimileikkausraudoitus lasketaan SFS-EN 1992-1-1 + A1 + AC (2015) mukaisesti seuraavasti:

$$A_{sw,min} = s \cdot b \cdot \sin \alpha \cdot 0,08 \cdot \sqrt{f_{ck}/f_{yk}}, \quad 3.21$$

josta saadaan laskettua kaavalla (3.15) tarvittava minimileikkausraudoitus metrille, joka on 8 mm 400 mm jakovälillä. Tämän jälkeen määritetään leikkauskestävyyden raja-arvo, mikä määrää minimileikkausraudojen alueen. Laskenta tapahtuu seuraavasti:

$$V_{Rd,min} = \frac{A_{sv}}{s} \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot \cot \theta \quad 3.22$$

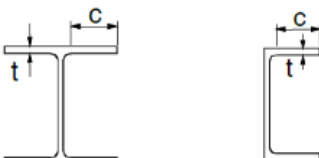
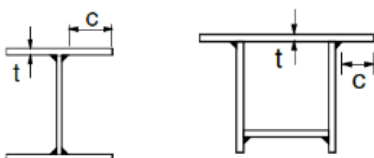
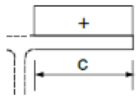
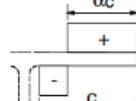
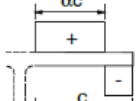
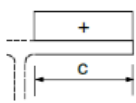
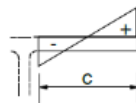
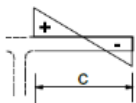
(SFS-EN 1992-1-1 + A1 + AC 2015).

2.3 Teräspalkki

Teräsprofiiliksi valitaan IPE160, sillä se on kevyin vaihtoehto I-profiileista (Be Group). Teräksen materiaali on S355, koska esimerkiksi Be Group toimittaa palkkeja vain kyseisenä teräslaatuuna (Teräsrakentajan käsikirja 2020). Lähtötiedot katsotaan Salmi ja Pajunen (2004) mukaan liitteestä C, jotka ovat korkeus h on 160 mm, leveys b on 82 mm, poikkipinta-ala A_t on 2010 mm² ja pituusmassa m_f on 15,80 kg/m. Teräksen murtolujuus f_y on 355 MPa ja kimmomoduuli E on 210 GPa.

Laskennassa käytetään samaa hyötykuormaa ja jänneväliä kuin puu- ja betonipalkin mitoituksessa. Ajatellaan palkin päälle tulevan pysyvän kuorman tulevan seinäpaneeleista, joille vähimmäiskuorma on 300 N/m², joten kuormitukseksi saadaan 300 N/m (Sandwich panel SPa).

Teräspalkki luokitellaan neljään eri luokkaan poikkileikkauksen perusteella. Luokitus tapahtuu laipalle kuvan 1 mukaisesti.

Ulokkeelliset laipat						
						
Poikkileik- kauluokka	Puristetut taso-osat	Puristetut ja taivutetut taso-osat				
		Vapaa reuna on puristettu		Vapaa reuna on vedetty		
Taso-osan jännitys- jakautuma (puristus positiivinen)						
1	$c/t \leq 9\epsilon$	$c/t \leq \frac{9\epsilon}{\alpha}$	$c/t \leq \frac{9\epsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$			
2	$c/t \leq 10\epsilon$	$c/t \leq \frac{10\epsilon}{\alpha}$	$c/t \leq \frac{10\epsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$			
Taso-osan jännitys- jakautuma (puristus positiivinen)						
3	$c/t \leq 14\epsilon$ ⁴⁾	$c/t \leq 21\epsilon\sqrt{k_{\sigma}}$ ⁵⁾ k _σ ks. EN 1993-1-5				
$\epsilon = \sqrt{235/f_y}$	f _y	235	275	355	420	460
	ε	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71

Kuva 1. Puristetun taso-osien suurimmat leveyspaksuussuhteet (SFS-EN 1993-1-1 2005)

Palkki on valssattu profiili. Kuvan 1 mukaisesti laipan luokka on 1, koska laipan pituuden suhde paksutteen on pienempi kuin 9ϵ . Vastaavasti uuman luokka määritetään kuvan 2 mukaisesti.

Kahdelta reunalta tuetut puristetut taso-osat						
Poikkileikkausluokka	Taivutetut taso-osat	Puristetut taso-osat	Taivutus ko. akselin suhteen			
Taso-osan jännitysjakautuma (puristus positiivinen)						
1	$c/t \leq 72\epsilon$	$c/t \leq 33\epsilon$	$\text{kun } \alpha > 0,5: c/t \leq \frac{396\epsilon}{13\alpha - 1}$ $\text{kun } \alpha \leq 0,5: c/t \leq \frac{36\epsilon}{\alpha}$			
2	$c/t \leq 83\epsilon$	$c/t \leq 38\epsilon$	$\text{kun } \alpha > 0,5: c/t \leq \frac{456\epsilon}{13\alpha - 1}$ $\text{kun } \alpha \leq 0,5: c/t \leq \frac{41,5\epsilon}{\alpha}$			
Taso-osan jännitysjakautuma (puristus positiivinen)						
3	$c/t \leq 124\epsilon$ ¹⁾	$c/t \leq 42\epsilon$ ²⁾	$\text{kun } \psi > -1: c/t \leq \frac{42\epsilon}{0,67 + 0,33\psi}$ ³⁾ $\text{kun } \psi \leq -1^{\text{*)}: c/t \leq 62\epsilon(1 - \psi)\sqrt{(-\psi)}$			
$\epsilon = \sqrt{235/f_y}$	f_y	235	275	355	420	460
	ϵ	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71

Kuva 2. Puristetun taso-osien suurimmat leveyspaksuussuhteet (SFS-EN 1993-1-1 2005)

Kuvan 2 mukaisesti uuma kuuluu luokkaan 1. Poikkileikkausluokka 1 on niitä, joissa plastisuusteorian mukaisen tarkastelun vaatima, riittävän kiertymiskyvyn omaava nivel voi syntyä ilman, että poikkileikkauksen kestävyttä tarvitsee pienentää (SFS-EN 1993-1-1 2005).

Palkin taivutuskestävyys lasketaan palkin plastisen taivutusvastuksen W_{pl} avulla.

$$M_{pl,Rd} = \frac{W_{pl} \cdot f_y}{\gamma_{M0}}, \quad 3.23$$

jossa materiaalin osavarmuusluku γ_{M0} on 1,0. Kaavasta (3.4) saadun taivutusjännityksen jälkeen pystytään laskemaan taivutusmomentin käyttöaste, joka on profiilille 20 %. Seuraavaksi palkille lasketaan leikkausvoimakestävyys seuraavasti:

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_v \cdot (f_y / \sqrt{3})}{\gamma_{M0}}, \quad 3.24$$

jossa A_v lasketaan I-profiilille, jossa kuormitus on uuman suuntainen, seuraavasti:

$$A_V = A - 2b \cdot t_f + (t_w + 2r)t_f. \quad 3.25$$

Kaavasta (3.3) saadun leikkausvoiman avulla saadaan leikkausvoimakestävyyden käyttöasteeksi 4,5 %. Tämän jälkeen tarkistetaan leikkausvoiman ja taivutusmomentin yhteisvaikutus. Taivutusmomenttikestävyyttä ei tarvitse resusoida, jos $V_{Ed} < 0.5V_{pl,Rd}$. Kyseisessä tapauksessa ehto täyttyy, joten määritetään käyttörajatila. Käyttörajatilassa lasketaan taipuma palkille seuraavasti:

$$w_{max} = \frac{5 \cdot (\sum_i^n g_i + \sum_i^n q_i) \cdot L^4}{384 \cdot E \cdot I_y} \quad 3.26$$

(SFS-EN 1995-1-1 2014). Taipuman raja-arvo on $L/400$, jolloin käyttöasteeksi saadaan 82 % (Eurokoodi 5 2018). Mitoitettu teräspalkki on samassa käyttöluokassa kuin puupalkkikin, joten vertailu olisi järkevää. Lopuksi tarkistetaan, että palkin paino ei ylitä aluksi arvioitua painoa kuormitusten laskennassa kaavalla

$$W_{pl} \cdot 9,81 \frac{m}{s^2} < 1,0 \frac{kN}{m}. \quad 3.27$$

(SFS-EN 1993-1-1 2005)

3. HIILIJALANJÄLJEN LASKENTA ERI PALKEILLE

Hiilijalanjälki lasketaan luvussa 2 laskettujen materiaalikulutuksien mukaan. Laskussa hyödynnetään Bionovan ohjelmaa One Click LCA Planetary Finland (2015) sekä SFS standardeja. Bionovan ohjelma laskee rakennusmateriaaleista syntyvän hiilidioksidiekvivalentin, jolla verrataan kasvihuonekaasun säteilypakotetta hiilidioksidin säteilypakotteenä (EN ISO 14067 2018).

3.1 Hiilijalanjäljen laskennan taustatieto

One Click LCA myy erilaisia lisenssejä ostajien käyttöön, jossa hiilijalanjälkeä voi laskea ottamalla huomioon rakennuksen eri elinkaaren vaiheita. Yksi lisenssi koskee Ympäristöministeriön julkaisemaan hiilijalanjäljen laskenta -ohjetta, josta on myös Excel-pohjainen versio. Eurokoodit EN 15978 ja EN 15804 määrittelevät hiilijalanjäljen laskennan lähtökohdat, joihin One Click LCA:n ohjelmat perustuvat, mutta muita lähteitä laskentaan on. Elinkaaren vaiheiden jaottelu tapahtuu eurokoodien mukaisesti kuvan 1 osoittamalla tavalla. (One Click LCA 2018)

Product Stage			Construction Process Stage		Use Stage							End-of-Life Stage				Benefits and loads beyond the system boundary		
Raw material supply	Transport	Manufacturing	Transport to building site	Installation into building	Use/application	Maintenance	Repair	Replacement	Refurbishment	Operational energy use	Operational water use	Deconstruction/demolition	Transport	Waste processing	Disposal	Reuse	Recovery	Recycling
A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4	D	D	D

Kuva 3. Elinkaarivaiheet eurokoodistandardien mukaan (One Click LCA 2018)

Kuvassa 3 ensimmäinen osa-alue, eli A1-A3, on materiaalin sitoutunut hiilijalanjälki, mitä EN 15804 pitää pakollisena laskennassa. Kyseinen osa-alue on tämän työn käsittelyalueena. Seuraava alue, eli A4-A5, on materiaalin kuljetukseen työmaalle ja sen asennukseen liittyviä päästöjä. Laajin alue, eli B1-B7, käsittää rakennusvaiheessa kaikkien muiden toimenpiteiden päästöjä, jotta rakenteesta saadaan toimiva. Seuraava alue, eli C1-C4, on materiaalin käyttöönoton jälkeistä päästöjä ja viimeinen D-alue on mahdollinen materiaalin kierrätys.

Tässä työssä on käytetty One Click LCA Planetary Finland ohjelmaa, sillä se on tällä hetkellä saatavilla ilmaisversiona. Kyseinen ohjelma laskee rakennusmateriaaliin sitoutuneen hiilijalanjäljen, eli alueet kuvan 1 määrittelemät alueet A1-A3. Ohjelma kertoo myös raaka-aineiden painon tonneina sekä kiloina neliötä kohden. Lähtötietoihin valitaan sopiva materiaali listasta sekä määritetään materiaalin määrä joko kuutioina tai kiloina. Materiaalin valinnalla voidaan vaikuttaa tuloksiin merkittävästikin, mutta tässä työssä on pyritty valitsemaan yleisin materiaali. Varsinkin betonin ja teräksen kohdalla voi vaikuttaa raaka-aineessa olevan kierrätetyn aineen määrään. Alussa pitää myös määrittää rakennuksen pinta-ala, sillä ohjelma laskee materiaalin suhteutettuna pinta-alaan. Tässä työssä lasketaan vain yhtä palkkia, joten sen tuomaa rasiitetta ilmastolle on turha jakaa järkevällä rakennuksen pinta-alla, vaan laitetaan lähtötietoihin yksi neliometri jokaisen palkin kohdalla. (Green Building Council 2020)

3.2 Hiilijalanjäljen laskenta jokaiselle palkille

Tuotteen hiilijalanjälkeä mitattaessa puhutaan tuotejärjestelmän kasvihuonekaasupäästöjen ja -poistumien summasta, joka ilmoitetaan laskennassakin käytettynä yksikkönä, eli hiilidioksidiekvivalenttina (EN ISO 14067 2018). Laskennan tulokset on esitetty kyseisellä arvolla kiloa kohden, eli $\text{kg CO}_2\text{e/m}^2$.

Puupalkin materiaaliksi valitaan yleisesti käytetty Kerto viilupuu, joka on Metsä Woodin valmistama. Lasketaan palkille kuutiotilavuus luvun 2 mittojen mukaan. Tulokseksi saadaan $8,06 \text{ kg CO}_2\text{e/m}^2$, mikä on hyvin vähän muihin verrattuna (One Click LCA Planetary 2020).

Normaalissa betonipalkissa käytetään raudoitteita, joten esimerkipalkin hiilijalanjälkeen otetaan myös huomioon laskettu terästen määrä, joka on esitetty luvussa 2. Teräksen vaikutus päästöjen määrään on alle 25 %, joten arvioidaan teräksen määrä karkeasti. Arvioinnissa käytetään halkaisijaltaan 12 millimetriä olevalle harjateräkselle painoa $0,888 \text{ kg/m}$ (Nelirauditus Oy 2009). Betoniksi valikoitui valmisbetoni lujusluokaltaan C30/37, niin kuin luvun 2 laskuissa on käytetty. Kyseiselle materiaalille on monta vaihtoehtoa, jotka eroavat masuunikuonan määrässä. Ohjelma antaa tyypilliseksi määräksi masuunikuonalle 10 %, joten valitaan se. (One Click LCA Planetary 2020)

Ilmaston lämpenemisen määrä on betonille $33,4 \text{ kg CO}_2\text{e/m}^2$ ja teräkselle $11,03 \text{ kg CO}_2\text{e/m}^2$, jolloin yhteismääräksi tulee $44,43 \text{ kg CO}_2\text{e/m}^2$ (One Click LCA Planetary 2020). Puupalkkiin verrattuna määrä on huomattavasti suurempi.

Teräspalkin materiaaliksi valitaan rakenneteräs, joka kattaa I-, H-, U-, L-, ja T-profiilit. Laskuohjelman mukaan tyypillinen määrä on 90 % kierrätettyä aineista, joten käytetään

kyseistä määrä. Teräksen painon kautta saadaan tulokseksi 45,48 kg CO₂e/m², joka on suurin päästöjen määrä tähän asti. (One Click LCA Planetary 2020)

Taulukossa 1 on esitetty yllä mainittujen tulosten määrä kootusti

Taulukko 1. *Hiilidioksidiekvivalentin määrä eri palkeille*

Rakennusmateriaali	Puu	Betoni	Teräs
Hiilidioksidiekvivalentti [kg CO ₂ e/m ²]	8,06	44,43	45,48

Taulukosta 1 nähdään, että puun hiilidioksidiekvivalentin määrä on huomattavasti pienempi, kuin betoni- tai teräspalkilla. Kahden edellä mainitun palkin välillä ei ole suurta eroavaisuutta ja teräspalkki tuottaakin noin yhden kilon enemmän päästöjä.

4. PUUN, BETONIN JA TERÄKSEN EROT

Tässä kappaleessa pohditaan tuloksiin vaikuttavia tekijöitä ja esitetään lukujen 2 ja 3 tulokset koontina. Tässä luvussa tuodaan myös esille mahdollisesti tuloksiin vaikuttavia virhetekijöitä ja pohditaan tämän tutkimuksen antamia tuloksia.

Yksi vertailuun tuoma virheellisyyden mahdollisuus on se, että eri materiaalista valmistettava palkki ei sovi aina samanlaiseen tilanteeseen. Tästä tutkimuksesta on havaittavissa, ettei teräsrakennetta ole tehokasta käyttää lyhyillä jänneväleillä, sillä teräspalkin massa on isompi kuin puupalkin ja hinta kalliimpi. Toinen virheellisyys on materiaalin valinnassa. Puusta saadaan monta erilaista rakennustarviketta. Kertopuustakin on ainakin kolme erilaista mallia Eurokoodi 5 (2018). Olisi ollut myös mahdollista valita sahatavara tai liimapuuta, mikä olisi voinut vaikuttaa tuloksiin. Kerto-S puuta käytetään yleensä ylä-, väli ja alapohjan kannattajaksi (Puuproffa). Siksi kyseinen palkkilaatu on tähän tehtävän valittu. Betonin massassa on masuunikuonan määrän vaihtelua valmistajakohtaisesti (One Click LCA Planetary 2020). Teräsprofiileja on monia, mutta IPE-profiili valikoitu tähän pienien rasituksien ja keveyden ansiosta (Salmi ja Pajunen 2004).

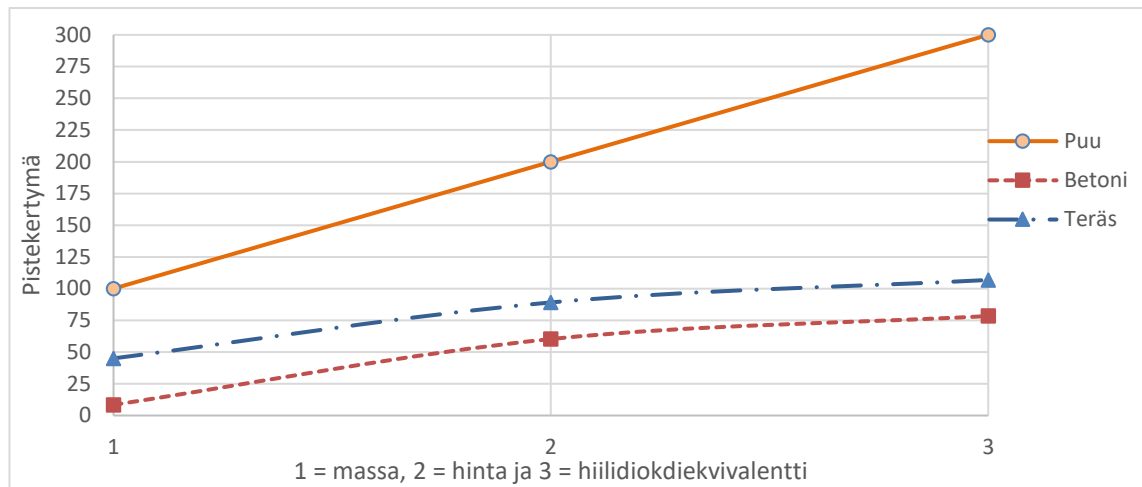
Taulukossa 1 on esitetty saadut tulokset kootusti sekä tuotu Haahtela & Kiiras (2015) mukaan kustannuseroja rakennusmateriaaleille. Kustannuserot ovat esitetty yleiskuvan luomisen vuoksi suhteellisilla arvoilla halvimman mukaan.

Taulukko 2. *Tulokset eri rakennusmateriaaleille*

Rakennusmateriaali	Puu	Betoni	Teräs
Massa [kg]	28,45	336,39	63,2
Hinta	1	1,9	2,3
Hiilidioksidiekvivalentti [kg CO ₂ e/m ²]	8,06	44,43	45,48

Taulukon 2 tuloksissa kyseenalainen asia on betoni- ja puupalkin hintaero. Yleisen käsityksen mukaan betoni on halvin raaka-aine. Tässä tutkimuksessa voikin kustannuseroihin tuoda virheellisyyttä lyhyehkö jänneväli ja pienet kuormat. Tässä työssä kustannuseroja on tarkasteltu vain taulukon 2 mukaisesti karkealla asteikolla. Lisäksi taulukon 2 tuloksista on nähtävissä, että rakennusmateriaalilta puu on kevyin ja sen hiilidioksidiekvivalentti on selkeästi pienin vertailtavista materiaaleista. Betonipalkista tulee painavin, mutta hiilidioksidiekvivalentin määrä on betoni- ja teräspalkilla samaa kokoluokkaa.

Kuvassa 4 on nähtävissä pisteytyskaavio rakennusmateriaaleille, jossa kevyin, halvin ja vähiten päästöjä saanut palkki on pisteytetty parhaimmaksi ja loput tämän suhteessa. Kukin osa-alue on tasavertainen.



Kuva 4. Palkkien pistekertymä, jossa pisteitä jaetaan sadasta alaspäin tulosten suhteella.

Kuvassa 4 vaaka-akselina toimii vertailun eri osa-alueet, eli yksi kuvastaa massaa, kaksi hintaa ja kolme hiilidioksidiekvivalentin määrää. Kuvasta 4 nähdään puupalkin saavan eniten pisteitä jokaiselta osa-alueelta tämän tutkimuksen pohjatietojen mukaan. Betoni- ja teräspalkin vertailu on tiukka, sillä kummallakin on omat vahvuudet eri osa-alueilla. Ero tulee teräksen vahvuusalueesta, eli massasta. Teräspalkki on huomattavasti kevyempi kuin betoniplakki, mutta betoni- ja teräspalkin hintaero ei ole yhtä iso.

Yleisen käsityksen mukaan betoni on käytetyin raaka-aine rakennusteollisuudessa. Puun selvä paremmuus päästöjen määrässä voisi ennustaa puun käytön kasvua rakennusmateriaalina. Tosin Ympäristöministeriö sanoo, ettei vähähiiliseen rakentamiseen keskittymällä ole vaikutusta rakennusmateriaalien käyttöön, jos hiilijalanjälki optimoidaan muiden osa-alueiden kautta paremmaksi (Ympäristöministeriö 2020). Betonin suosion takia raaka-aine tuskin tulee poistumaan rakennusalalta, joten toivottavaa on, että betonista saadaan tulevaisuudessa myös vähäpäästöisempi.

Tutkimuksen suppeus voi tuoda virheellisyyttä tuloksiin, joten luotettavamman tuloksen eri rakennusmateriaalien paremmuudesta antaisi kokonaisen rakennuksen tarkastelu. Tässäkin ongelmaksi saattaisi tulla rakennuksen käyttötarkoitus, sillä jännevälit, jäykistysmahdollisuudet ja kuormat vaikuttavat merkittävästi, mitä rakennusmateriaalia on ideaalisinta käyttää. Eerolan (2020) opinnäytetyössä on laajempaa vertailua päästöjen osalta. Tutkimuksessa päästiin samaan lopputulokseen, eli puurakenteinen halli oli vähäpäästöisiin, betonirakenteinen tuli toiseksi noin 5 % erolla eniten päästöjä kerryttävään teräshalliin.

5. PÄÄTELMÄT

Tämä tutkimus käsittelee puu-, betoni ja teräspalkin eroja hiilidioksidiekvivalentin määrän suhteen tuoden kokonaiskuvaa massan ja hinnan erojen kautta. Eri palkkien mitoitus esitetään luvussa kaksi. Luvussa kolme lasketaan hiilidioksidiekvivalentin määrä One Click LCA Planetary Finland (2020) -ohjelman avulla. Saatujen tulosten perusteella koottiin taulukko yksi, joka on esitetty luvussa neljä. Samassa luvussa on pohdittu tulosten pohjalta rakennusmateriaalien eroja ja laitettu eri palkit paremmuusjärjestykseen.

Tässä tutkimuksessa mitoitetaan puu-, betoni- ja teräspalkki käyttäen samaa jänneväliä ja hyötykuormaa. Pysyvä kuorman arvioitiin jokaiselle rakennusmateriaalille sopivaksi. Lopputulokseksi puupalkiksi valitaan tyypiltään Kerto-S, jonka leveys on 57 mm ja korkeus 260 mm, betonipalkiksi valikoitu laadultaan C30/37, jonka leveys on 150 mm ja korkeus 220 mm ja teräspalkiksi valittiin IPE 160-profiili. Eri materiaalien kantavuuslaskelmat eroavat jokseenkin paljon toisistaan, sillä materiaalien fysikaaliset ominaisuudet ovat erilaiset. Erilaisuus tulee esimerkiksi esiin siinä, että raudoitettu betoni on puuta kestävämpää, mutta painavampaa, joten betonia tarvitaan enemmän kuin puuta.

One Click LCA Planetary Finland (2020) laskee hiilidioksidiekvivalentin ainoastaan rakennusmateriaaliin sitoutuneiden päästöjen mukaan. Laskennat tehdään EN 15978 ja EN 15804 standardien pohjalta. Ohjelmaan valittavien materiaalien valinnassa pyritään valitsemaan tyypillisin ratkaisu.

Pieni rakenne saattaa tuoda tuloksiin virheellisyyttä, mutta tämän tutkimuksen tuloksilla puu olisi paras rakennusmateriaali jokaisella vertaillulla osa-alueella, kuten kuvasta 4 on nähtävissä. Betoni- ja teräspalkki ovat hyvin tasavertaisia, mutta teräspalkki voittaa vertailun keveytensä ansiosta. Tulevaisuudessa kiinnostusta, kuinka vähähiilinen rakentaminen vaikuttaa rakennusmateriaalien valintaan ja kasvaako puurakentaminen Suomessa.

LÄHTEET

BE Group, Teräspalkit IPE-palkit, <https://www.begroup.fi/tuotteet/terastanko-ja-profiilituotteet/teraspalkit/ipe-palkit/> (19.9.2020)

Eerola Juho (2020), Ympäristöministeriön vähähiilisen rakentamisen ohjeen vaikutus rakennesuunnittelussa, Opinnäytetyö

Eurokoodi 5 (2010), EC 5 sovelluslaskelmat Asuinrakennus, Puuinfo, s. 92

Eurokoodi 5 (2018), Puurakenteiden lyhennetty suunnitteluohje, Neljäs Painos, Puuinfo, s.21 ja s. 55

Green Building Council Finland (2020), One Click LCA Planetary – Ilmanen sovellus materiaaleihin sitoutuneen hiilen laskentaan, GBC Suomi ry, <https://figbc.fi/planetary/> (2.12.2020)

Haahtela Y. & Kiiras J. (2015), Talonrakennuksen kustannustieto 2015, ???, s. 221 ja muita?

Ilmasto-opas.fi, Säteilypakote kuvaa ilmastojärjestelmän epätasapainoa, Ilmatieteenlaitos, <https://ilmasto-opas.fi/fi/ilmastonmuutos/ilmio/-/artikkeli/eb06632f-d946-4d47-8e17-16a7351c43ff/sateilypakote.html> (7.12.2020)

Makkonen L. (2011), Lumen ja jään kertymiseen liittyvät kuormat, Rakennussäätiö RTS, Rakennustieto OY ja Rakennusmestarit ja insinöörit AMK RKL ry, <https://www.rakennustieto.fi/Downloads/RK/RK110303.pdf> (20.4.2020)

Neliraudoitus Oy (2009), Harjateräs painot, <http://www.neliraudoitus.fi/index.php?id=49&kieli=1> (12.10.2020)

One Click LCA (2018), Bionova Ltd, <https://www.oneclicklca.com/support/faq/> (2.12.2020)

One Click LCA Planetary (2020), Helsinki: Bionova Ltd

Puuproffa, Puutieto, Kertopuu, <https://puuproffa.fi/puutieto/puun-jalostaminen/kertopuu/> (22.4.2020)

Salmi T. & Pajunen S. (2004), Lujuusopin perusteet, Pressus Oy, s. 172, 181 ja 423

Sandwich panel SPA tuoteseloste (2020), Rukki Consturctio, s. 12, https://cdn.ruukki.com/docs/default-source/b2b-documents/sandwich-panels/fi_sandwich_panel_spa_product_description_03_2020.pdf?sfvrsn=3b86b484_8 (19.9.2020)

Seppänen R. et. al. (2013), Maol taulukot, Otavan Kirjapaino Oy, s. 125 ja 139

SFS-EN ISO 14067 (2018), Kasvihuonekaasut. Tuotteiden hiilijalanjälki. Hiilijalanjäljen laske-
mista koskevat vaatimukset ja ohjeet, Suomen standardisoimisliitto SFS, s.8, s.10 ja s. 13

SFS-EN 1992-1-1 + A1 + AC (2015), Eurokoodi 2: Betonirakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt, Suomen standardisoimisliitto SFS, s. 218

SFS-EN 1991-1-1 + AC (2002), Eurokoodi 1: Rakenteiden kuormat osa 1-1: Yleiset kuormat, tilavuuspainot, omat painot ja rakennusten hyötykuormat, Suomen standardisoimisliitto SFS, s. 73

SFS-EN 1993-1-1 (2005), Eurokoodi 3: Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt, Suomen standardisoimisliitto SFS, s.42, 45-46, 53-54, 60

SFS-EN 1995-1-1 (2014), Eurokoodi 5: Puurakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt, Suomen standardisoimisliitto SFS, s. 50

Teräsrakentajan käsikirja (2020), BE Group Oy Ab, s.5, https://www.begroup.fi/fileadmin/user_upload/images_and_files/Finland/Esitteet/BE-Group-Terasrakentajan-kasikirja-web.pdf (19.9.2020)

Virolainen Miia (2020), Rakennuksen hiilijalanjälkeen vaikuttavat materiaalit, Opinnäytetyö

Ympäristöministeriö (2018), Rakennusten hiilijäljen arviointimenetelmä lausuntokierrokselle – tavoitteena tuottaa tietoa rakennusten ilmastovaikutuksista, Tiedote 16.11.2018, [https://www.ym.fi/fi-FI/Rakennusten_hiilijalanjaljen_arviointime\(48507\)](https://www.ym.fi/fi-FI/Rakennusten_hiilijalanjaljen_arviointime(48507)) (16.2.2020)

Ympäristöministeriö (2019), Rakennuksen vähähiilisyyden arviointimenetelmä, Ympäristöministeriön julkaisuja 2019:22, http://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/161761/YM_2019_22_Rakennuksen_vahahiilisyyden_arviointimenetelma.pdf?sequence=1&isAllowed=y (9.2.2020)

Ympäristöministeriö (2019), Rakennusten hiilijalanjäljen arviointimenetelmä siirtyy rakennushankkeen testattavaksi, Ajankohtaista, [https://www.ym.fi/fi-FI/Ajankohtaista/Rakennusten_hiilijalanjaljen_arviointime%2851469%29_\(9.2.2020\)](https://www.ym.fi/fi-FI/Ajankohtaista/Rakennusten_hiilijalanjaljen_arviointime%2851469%29_(9.2.2020))