

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Teknillinen tiedekunta

Ympäristötekniikan koulutusohjelma

Kandidaatintyö

HIRSIRAKENTEISEN OMAKOTITALON HIILIJALAN- JÄLKI

The Carbon Footprint Assessment of a Log Framed House

Työn tarkastaja: Tutkijaopettaja, TkT, Mika Luoranen

Työn ohjaaja: Tutkijatohtori, TkT, Sanni Väisänen

Lappeenrannassa 23.1.2015

Anna Claudelin

SISÄLLYSLUETTELO

SYMBOLILUETTELO	3
1 JOHDANTO	4
2 RAKENNUSTEN HIILIJALANJÄLKI.....	5
2.1 Rakennuksen elinkaari.....	5
2.1.1 Rakentamisvaihe.....	7
2.1.2 Käyttövaihe.....	8
2.1.3 Purkuvaihe	9
2.1.4 Elinkaaren ulkopuoliset vaikutukset.....	10
2.2 Yksinkertaistukset ja rajaukset	10
3 RAKENNUSMATERIAALIN JA KÄYTTÖAJAN VAIKUTUS HIILIJALANJÄLKEEN	13
3.1 Laskennassa käytettävä tyypitalo.....	15
3.1.1 Hirrestä rakennettu tyypitalo	16
3.1.2 Puusta rakennettu tyypitalo.....	16
3.1.3 Kivitalo	17
3.2 Rakentamis- ja käyttövaihe.....	17
3.2.1 ILMARI-arviointipalvelu.....	17
3.2.2 Synergia-laskuri	20
3.3.3 Energiankulutuksen ja kunnossapidon päästöt	20

3.3 Hiilivarasto.....	24
3.4 Purkuvaiheen vaikutus	25
4 HIILIJALANJÄLJEN ARVIOINTIA	26
4.1 Hiilijalanjäljen laskenta	26
4.1.1 Rakentamisvaihe	26
4.1.2 Käyttövaihe	29
4.1.3 Purkuvaihe	32
4.1.4 Hiilivarasto.....	33
4.2 Hiilijalanjälki	33
4.3 Rakenteisiin sitoutuneen energian hyötykäyttö	35
4.4 Hirren paksuuden vaikutus ja U-arvon parantaminen	38
5 JOHTOPÄÄTÖKSET	40
6 YHTEENVETO.....	42
LÄHTEET	44

SYMBOLILUETTELO

A	rakennusosan pinta-ala	[m ²]
c_p	ominaislämpökapasiteetti	[J/kgK]
T	lämpötila	[°C]
U	rakennusosan lämmönläpäisykerroin	[W/m ² K]
Q	johtumislämpöhäviö	[kWh]
q_v	tilavuusvirtailmavirta	[m ³ /s]
q_{50}	rakennusvaipan ilmanvuotoluku	[m ³ /hm ²]
x	vuotoilmalaskuissa käytettävä kerroin, yksikerroksisille rakennuksille 35	
Δt	tarkasteltavan ajanjakson pituus	[h]
ρ_i	ilman tiheys	[kg/m ³]

Alaindeksit

i	ilma
s	sisäilma
u	ulkoilma

1 JOHDANTO

Rakennukset ja rakentaminen aiheuttavat noin 40 % Suomen kasvihuonekaasupäästöistä (Sitra 2014). Siksi rakennetun ympäristön päästöjen pienentämisellä on suuri merkitys kehityttäessä kohti vähäpäästöistä yhteiskuntaa ja tavoiteltaessa energiatehokkuusdirektiivin mukaista uudisrakennusten nollaenergiatasoa vuoteen 2020 mennessä. Koska käytönaikaiseen energiankulutukseen voidaan vaikuttaa jo hyvin, korostuu rakennuksen koko elinkaarta tarkastellessa rakentamisesta aiheutuvien päästöjen vaikutus. Viime vuosina rakentamisessa onkin alettu käyttää yhä enemmän hirsirakenteita, jotka sitovat hiilidioksidia huomattavasti enemmän kuin muut talorakenteet (Alasaarela 2008b, 4).

Tässä kandidaatintyössä on tarkoituksena selvittää ”kehdestä hautaan” -laskentatavalla hiilijalanjäljet kahdelle hirsitalolle, joilla on eripaksuiset ulkoseinät, sekä kivi- ja puurakenteisille omakotitaloille. Hiilijalanjäljessä huomioidaan rakentamis-, käyttö- ja purkuvaiheet. Huomioon otetaan lisäksi lämmitysenergia, jota saadaan erityisesti hirsiin sitoutuneesta käytettävissä olevasta bioenergiasta ja hirsien valmistuksen sivutuotteista. Myös rakenteisiin varastoituneen hiilidioksidin määrä selvitetään, vaikka sitä ei voikaan käytetyn ohjeistuksen mukaisesti sisällyttää hiilijalanjälkilaskentaan.

Työssä vertaillaan eri seinämateriaaleista rakennettujen talojen rakentamisesta aiheutuvia kasvihuonekaasupäästöjä, tarkastellaan materiaalin vaikutusta käytönaikaisen energiankulutuksen aiheuttamiin päästöihin sekä pohditaan hirsiseinän paksuuden vaikutusta hirsitalon hiilijalanjälkeen.

Laskennoissa on käytetty saatavilla olevia tietoja ja tyyppitaloa on yksinkertaistettu, joten hiilijalanjäljet eivät täysin vastaa todellisuutta. Ne ovat kuitenkin keskenään vertailukelpoisia ja antavat kuvaa rakennusmateriaalin vaikutuksesta hiilijalanjälkeen.

2 RAKENNUSTEN HIILIJALANJÄLKI

Hiilijalanjälki kuvaa jonkin tuotteen tai palvelun tuottamaa kasvihuonekaasupäästö määrää. ”Kehdosta hautaan” -laskentatavalla mitataan hiilijalanjälkeä tuotteen koko elinkaaren ajalta eli raaka-aineiden hankinnasta loppusijoitukseen saakka. Joissain tapauksissa, kuten tehtailla, jotka valmistavat jotakin tuotetta, voidaan käyttää myös ”kehdestä portille” -laskentatapaa. Tämä laskentatapa huomioi ainoastaan tuotteen valmistuksesta syntyneet kasvihuonekaasupäästöt. (SFS EN-15804, 22.) Hiilijalanjälkiä laskettaessa kasvihuonekaasut on muutettu hiilidioksidiekvivalenteiksi Global Warming Potential -kertoimien avulla, mikä helpottaa niiden ilmaisemista ja vertailua (IPCC 2006). Aiemmin hiilijalanjäljen laskentaan ei ole ollut olemassa standardeja, joten hiilijalanjälkien vertailu toisiinsa on ollut haasteellista.

Vuonna 2013 International Organization for Standardization julkaisi ISO/TS 14067:2013 -standardin, joka määrittelee vaatimukset, periaatteet ja ohjeistuksen hiilijalanjäljen laskemiseksi. Standardi perustuu elinkaarimallinnuksen ja ympäristömerkkien standardeihin ja se sisältää vaatimukset ja ohjeistuksen myös tuotteen osittaisen hiilijalanjäljen laskentaan. Standardi ohjeistaa läpinäkyvyyteen ja luotettavuuteen. (ISO 2013.)

Rakennuksen elinkaaren aikainen hiilijalanjälki voidaan laskea EN 15804:2012 -standardin mukaisesti, jolloin laskennassa on otettu huomioon kasvihuonekaasupäästöt rakentamisvaiheesta käytönajan kautta rakennuksen purkamiseen saakka (Pasanen 2013). Green Building Council Finland (GBC Finland) on kehittänyt rakennusten elinkaarimittariston, jonka yhtenä neljästä osa-alueesta on ilmastovaikutukset. Mittarit perustuvat suomalaisen lainsäädäntöön ja eurooppalaiseen rakennusalan ympäristöstandardisointiin. (GBC Finland 2013, 4.) Tässä työssä tyyppitalojen hiilijalanjäljet on laskettu käyttäen tätä EN 15804 -standardiin pohjautuvaa ohjeistusta. EN 15804 -standardi on myöhemmin korvattu EN 15804 + A1:2014 -standardilla, joka ei kuitenkaan poikkea EN 15804 -standardista rakennuksen hiilijalanjäljen laskennan kannalta olennaisten seikkojen osalta.

2.1 Rakennuksen elinkaari

Suurimmat vaikutukset rakennuksen elinkaaren aikana tuotettuihin kasvihuonekaasupäästöihin määräytyvät jo suunnitteluvaiheessa (GBC Finland 2013, 35). Suunnitteluvaiheessa

tehtyjen, rakentamiseen tai käyttöön liittyvien ratkaisujen muuttaminen voi olla hyvin kallista tai jopa mahdotonta, joten huolellisesti tehty suunnittelu on tärkeää.

Rakennuksen elinkaaren vaiheet voidaan jakaa kolmeen ryhmään: rakentamiseen, käyttövaiheeseen ja purkamiseen. Nämä vaiheet jaetaan pienempiin osiin eli moduuleihin. Lisäksi otetaan huomioon myös elinkaaren ulkopuoliset vaikutukset, jotka sisältävät muuan muassa rakennusmateriaalin kierrätyksen ja uudelleenkäytön. (GBC Finland 2013, 40). Alla olevassa taulukossa 1 on esitetty rakennuksen elinkaaren eri vaiheet ja niiden keskeiset sisällöt SFS 15804 -standardin mukaisesti.

Taulukko 1: Rakennuksen elinkaaren vaiheet ja niiden keskeiset sisällöt (GBC Finland 2013, 32–33).

Elinkaaren vaihe	Keskeinen sisältö
A1–A3 Tuotevaihe	Rakennustuotteiden koko valmistusketjun päästöt EN 15804 -standardin mukaisesti. Laskenta huomioi vain rakennuksen ja sen osat, eikä esim. huonekaluja tai käyttäjien laitteita
A4 Kuljetukset työmaalle	Rakennustuotteiden ja koneiden kuljetukset, kuljetuksista aiheutuva hävikki. Maansiirto, jossa siirrellään tai vaihdetaan maa-aineksia. Työvoiman kuljetuksia ei huomioida.
A5 Työmaatoiminnot	Kaikki työmaan toiminnot: sisältää maansiirron, varastoinnin, energiankäytön, jätehuollon ja väliaikaiset rakenteet (kuten valumuotit ja suojamateriaalit).
B1 Käyttö	Kylmäainevuodot ja mahdolliset muut suorat kasvihuonekaasupäästöt ilmaan.
B2 Kunnossapito	Huollossa, ylläpidossa ja siivouksessa käytettävät tuotantopanokset ja näiden kuljetus ja jätehuolto. Ylläpidolla tarkoitetaan tässä suunniteltua ja ennakoitua ylläpitoa.
B3 Korjaus	Rikkoutuneiden rakennusosien korjaamiseen tarvittavat materiaalit ja niiden käsittely sekä rikkoutuneiden osien jätteen käsittely.
B4 Osien vaihto	Merkittävien rakennusosien suunniteltu vaihto niiden teknisen tai taloudellisen elinkaaren

	päässä. Esim. ilmanvaihtokoneen tai ikkunoiden vaihtaminen.
B5 Laajamittaiset korjaukset	Rakennuksen merkittävä korjaus tai muuntaminen, kuten peruskorjaus tai energiaratkaisujen muutokset.
B6 Energian käyttö	Sisältää kaiken rakennuksen järjestelmien kuluttaman rakennukseen ulkopuolelta tuodun energian, jota käytetään lämmitykseen, lämpimän käyttöveden tuottamiseen, ilmanvaihtoon, jäähdytykseen, valaistukseen tai rakennusautomaatioon.
B7 Veden käyttö	Sisältää puhtaan veden tuotannon ja tuotetun jäteveden käsittelyn päästöt käytön ajalta.
C1 Purkaminen	Rakennuksen purkaminen rakennuspaikalla ja sen välittömässä läheisyydessä ja tähän liittyvien koneiden käyttämä energia ja koneiden kuljetukset.
C2 Purkuvaiheen kuljetukset	Kaikki purkujätteestä ja työkaluista aiheutuva kuljetus jäteominaisuuden päättymistilaan saakka, huomioiden mahdolliset välivarastointi- ja siirtokuormauskuljetukset.
C3 Purkujätteen käsittely	Kaikki jätteen käsittelyn vaiheet, kunnes jäte saavuttaa jäteominaisuuden päättymistilan.
C4 Purkujätteen loppusijoitus	Kaikki sellaisen jätteen käsittelystä syntyvät päästöt, jonka käsittelytapa on loppusijoitus tai energian tuotanto, ja jonka elinkaari päättyy lopullisesti.
D Elinkaaren ulkopuoliset vaikutukset	

2.1.1 Rakentamisvaihe

EN 15804 -standardin mukaisesti rakentamisvaihe pitää sisällään kolme vaihetta: tuotevaihe, kuljetukset työmaalle sekä työmaatoiminnot. Standardi jakaa tuotevaiheen kolmeen osaan eli moduuliin, jotka on nimetty tunnuksilla A1, A2 ja A3. A1 sisältää raaka-aineiden hankinnan ja käsittelyn sekä kierrätysmateriaalien käsittelyn, A2 raaka-aineiden kuljetuksen valmistukseen ja A3 valmistuksen. Näiden kasvihuonekaasupäästöjä laskettaessa huo-

mioidaan vain rakennus sekä sen osat eli huonekaluja ja käyttäjien laitteita ei huomioida. Myös osa rakennusmateriaaleista ja -osista rajataan pois EN 15978 -standardin kappaleen 8.5.2 perusteella. Aluerakentamisesta ja kunnallistekniikasta huomioidaan tuotu maa- ja kiviaines, paalutukset, vahvistukset ja päällysteet. Mahdollisen vanhan rakennuksen purkamista, pilaantuneen maan kunnostamista, kunnallistekniikkaa eikä tontin ulkopuolisia teitä huomioida. (GBC Finland 2013, 34.)

Maanlaadusta riippuen rakennuksen perustusten vaikutus rakennuksen hiilijalanjälkeen voi olla jopa yhtä suuri kuin muiden rakennusmateriaalien yhteensä. Perustusten tekeminen heikkolaatuiselle maalle vaatii paljon kalkkia ja sementtiä, joilla on suuri hiilijalanjälki. Tavallisesti hiilijalanjälkeen vaikuttaa kuitenkin eniten, eli noin 60 %, rakennuksen runkorakenne, johon kuuluvat ulko- ja väliseinät sekä väli- ja yläpohjat. (Rantajärvi 2013.) Näiden lisäksi hiilijalanjäljen tuotevaiheeseen kuuluvat muun muassa pilarit, palkit, julkisivu- ja pintamateriaalit sekä tekniikkaosat. Pintamateriaaleista ei huomioida tapetointeja eikä muuta sisustusta ja tekniikkaosista huomioidaan vain rakennuksen olosuhteisiin vaikuttavat asiat kuten ilmanvaihto. (GBC Finland 2013, 34.)

Rakentamisvaiheen moduuli A4 käsittää kuljetukset työmaalle, jotka eivät sisällä työvoiman kuljetusta. Kuljetukset sisältävät rakennuskoneiden ja -materiaalien kuljetukset sekä kuljetuksista aiheutuvan hävikin. Lisäksi huomioon otetaan maansiirto, jossa maa-ainesta kuljetetaan työmaan ulkopuolelta tai ulkopuolelle. (GBC Finland 2013, 32.)

Työmaatoimintojen vaihe eli moduuli A5 pitää sisällään kaikki työmaatoiminnot, joita ovat työmaalla tapahtuva maansiirto, energiankäyttö, varastointi ja jätehuolto. Lisäksi huomioidaan väliaikaiset rakenteet, kuten valutöissä tarvittavat tukirakenteet, jotka kuluttavat pysyvästi materiaaleja. Huomioitua jätetään sellaisenaan uudelleen käytettävät rakenteet, kuten rakennustelineet, ja muun muassa työkoneiden valmistuksesta aiheutuneet päästöt. (GBC Finland 2013, 32, 34.)

2.1.2 Käyttövaihe

Käyttövaihe sisältää nimensä mukaisesti ajan rakennuksen luovutushetkestä sen purkamiseen ja se sisältää seitsemän moduulia. Moduuli B1 sisältää käytön aikaiset päästöt ympäristöön, joita ovat rakenneosien aiheuttamat ympäristövaikutukset normaaleissa olosuhteis-

sa. Esimerkiksi julkisivuista tai katosta ilmakehään, maahan tai vesistöihin päätyvät aineet kuuluvat tähän moduuliin. (SFS EN-15804, 21.)

Moduulit B2 ja B3 kattavat kunnossapidon ja korjauksen. Kunnossapito tarkoittaa rakennuksen tai sen osien pitämistä teknilliset ja toiminnalliset vaatimukset täyttävinä ja se on suunniteltua ja ennaltaehkäisevää. Lisäksi moduuli sisältää kunnossapitotoimissa, kuten siivouksessa, käytetyn sähkön ja veden. Vastaavasti korjausmoduuli tarkoittaa rakennuksen ja sen osien saattamista takaisin sellaiseen tilaan, että se täyttää teknilliset ja toiminnalliset vaatimukset. Esimerkiksi rikkoutuneen ikkunalasin korjaus kuuluu korjausmoduuliin ja huomioon otetaan kaikki uuden ikkunalasin valmistamisesta aina pakkausjätteen hävittämiseen ja lasin asentamisesta koituneisiin vaikutuksiin saakka. Jos joudutaan vaihtamaan kokonainen vaurioitunut elementti, kuuluu se moduuliin B4 eli ”osien vaihto”. Koko rakennukseen tai suureen osaan rakennusta kohdistuvat korjaukset kuuluvat moduuliin B5 eli ”laajamittaisiin korjauksiin”. (SFS EN-15804, 22.)

Moduulit B6 ja B7 sisältävät rakennuksen teknisten järjestelmien käyttöön tarvittavan energian ja vedenkulutuksen. Käytön aikainen energian kulutus sisältää energian kulutuksen lisäksi energiamuodon käsittelystä, kuljetuksesta sekä tontilla tapahtuvasta jätteenhuollosta aiheutuvat vaikutukset ympäristöön. Myös käytön aikainen veden käyttö sisältää kulutuksen lisäksi veden hankinnan, käsittelyn ja siirron sekä jäteveden siirron ja käsittelyn aiheuttamat vaikutukset ympäristöön. (SFS EN-15804, 23–24.)

2.1.3 Purkuvaihe

Kolmas, eli C-moduuliryhmä käsittelee rakennuksen purkuvaihetta, joka alkaa kun rakennus puretaan tai korvataan, eikä se enää täytä sille asetettuja teknillisiä ja toiminnallisia vaatimuksia. Aluksi kaikki rakennuksen purkamisesta saatu materiaali ja rakennustuotteet luokitellaan jätteeksi, mutta tietyt kriteerit täyttämällä ne voivat saavuttaa jäteominaisuuden päättymistilan (end-of-waste), joka tarkoittaa, että sitä voidaan hyödyntää kierrätysmateriaaleina ja -polttoaineina. Tilaan pääsemiseksi purkujätteen käyttötarkoituksen tulee olla määriteltä, sille tulee olla olemassa olevaa kysyntää tai markkinoita, sen tulee täyttää lakisääteiset ja muut vaatimukset ja sen tulee täyttää SVHC-aineille (erityistä huolta aiheuttaville aineille) asetetut raja-arvot (SFS EN-15804, 24, 48).

Moduuli C1 pitää sisällään varsinaisen purkamisen sekä jätteiden työmaalajittelun. C2-moduuli sisältää purkujätteen kuljetuksen esimerkiksi kierrätyspaikalle tai loppusijoitukseen. C3-moduuli puolestaan kattaa purkujätteen käsittelyn, kuten jätejakeiden keräämisen purkupaikalta, uudelleenkäyttöön suunniteltujen materiaalivirtojen käsittelyn, energian talteenoton ja kierrätyksen. Koko prosessi on mallinnettava ja inventaarioon on sisällytettävä kaikki perusvirrat. Materiaali voidaan katsoa energian tuotannon kierrätyspolttoaineeksi, mikäli se käytetään energiantuotantolaitoksessa, jonka hyötysuhde on vähintään 60 % eikä voimassaoleva lainsäädäntö määrää toisin. Vain jäteominaisuuden päättymistilan saavuttaneet jätteet voidaan luokitella energian tuotannon polttoaineeksi. Moduuli C4 sisältää purkujätteen loppusijoituksen, kuten jätteen fysikaalisen esikäsittelyn ja loppusijoituspaikan ylläpidon, ”saastuttaja maksaa” -periaatteella tarkasteltuna. Mikäli prosessissa syntyy esimerkiksi jätteenpolton seurauksena energiaa kuten lämpöä, kuuluu se moduuliin D. (SFS EN-15804, 24–25).

2.1.4 Elinkaaren ulkopuoliset vaikutukset

Moduuli D sisältää elinkaaren ulkopuoliset vaikutukset. Sen pyrkimyksenä on lisätä läpinäkyvyyttä rakennuksen elinkaaren ympäristövaikutuksia esitettäessä. Moduulissa D on huomioitu uudelleenkäytettävien tuotteiden, kierrätettävien materiaalien ja kierrätyspolttoaineina käytettävistä energiamuodoista aiheutuvat hyödyt ympäristölle. (SFS EN-15804, 25) Moduuliin sisällytetään muista moduuleista poisjätetyt ympäristöhyödyt, jolloin välitetään kaksoislaskenta ja selkiytetään elinkaaren rajauksia (GBC Finland 2013, 40).

2.2 Yksinkertaistukset ja rajaukset

Hiilijalanjalan laskennan yleisen rajaussäännön (cut-off) mukaan tarkastelusta voi jättää pois vähämerkitykselliset päästölähteet, mikäli niistä ei ole tietoa saatavilla. Poisjätettävän osa-alueen osuus rakennuksen kokonaismassasta tai -energiankulutuksesta ei saa olla korkeampi kuin 1 %, ja kaikkien poisrajattujen päästölähteiden summan osuus ei saa ylittää 5 % rakennuksen kokonaismassasta tai -energiantarpeesta. Sääntöä ei kuitenkaan saa soveltaa, mikäli tietoa on saatavilla eikä sitä saa käyttää tietojen piilottamiseksi. (GBC Finland 2013, 35.)

Koska tässä työssä ei ole tiedossa tarkkoja suunnittelu- ja laskentatietoja, on laskentaa yksinkertaistettu. Näin ollen laskentaan on käytetty oletusarvoja niissä tapauksissa, kun soveltuvia suunnitteluarvoja tai todellisia arvoja ei ole ollut saatavilla kohtalaisen helposti. Oletusarvot ovat yleensä jonkin verran yleistä keskiarvoa suurempia arvoja ja niillä helpotetaan varhaisen rakennusvaiheen laskentaa. On suositeltavaa korvata oletusarvoja todellisilla arvoilla hankkeen edetessä luotettavamman lopputuloksen saamiseksi. (GBC Finland 2013, 35–36). Tässä työssä se ei kuitenkaan ole mahdollista. Alla olevassa taulukossa 2 on esitetty moduulit, joita voidaan yksinkertaistaa GBC Finlandin ohjeistuksen mukaisesti sekä näihin yksinkertaistukseen liittyvät toimintatavat.

Taulukko 2: Moduuleihin sallitut yksinkertaistukset sekä niiden edellytykset ja toimintatavat (GBC Finland 2013, 36).

Elinkaaren vaihe	Yksinkertaistus	Yksinkertaistuksen edellytys ja toimintatapa
A4–A5 Rakentamisvaihe	Laskea oletusarvolla	Voidaan käyttää ennen urakasuunnitelmien laadintaa. Lasketaan työmaan lämmitysenergialla 200 kWh/ brm ² , jos energiamuoto ei tiedossa, lasketaan sähköinä.
B1 Käyttö	Jättää huomioimatta	Voidaan jättää huomioimatta, jos kohteeseen ei tule merkittävästi kylmäaineita (arviointiperusteena jäädytysteho alle 40 W/brm ²).
B2 Kunnossapito	Laskea oletusarvolla	Jos rakennuksen todellista huolto-ohjelmaa ei tunneta, voidaan laskea oletusarvolla 2 kg CO ₂ -ekv/brm ² / vuosi.
B3 Korjaus	Jättää huomioimatta	Voidaan jättää huomioimatta, jos korjaustarvetta ei pystytä arviomaan.
B5 Laajamittaiset korjaukset	Jättää huomioimatta, jos käyttöikä alle 30 v.	Voidaan jättää huomioimatta jos käyttöikä on alle 30 v., tai jos voidaan osoittaa, että rakennus ei

		tarvitse käyttöönsä aikana peruskorjausta.
B6 Energian käyttö	Laskea ostosähköllä	Jos kohteen energiaratkaisua ei ole suunniteltu tai siitä ei ole päätetty.
B7 Veden käyttö	Laskea kokonaiskulutukselle, jos ei teollisuuskiinteistö	Kaikille muille kuin teollisuuskiinteistöille voidaan halutessa huomioida kohteen kaikki vedenkäyttö.
C1–C4 Purkuvaihe	Laskea oletusarvolla	Ennen kuin massoittelu on suunniteltu / tiedossa, voidaan laskea oletusarvolla, arvona 20 kg CO ₂ -ekv/brm ² .
D Elinkaaren ulkopuoliset vaikutukset	Jättää huomioimatta	Ennen kuin massoittelu on suunniteltu / tiedossa.

3 RAKENNUSMATERIAALIN JA KÄYTTÖAJAN VAIKUTUS HIILI-JALANJÄLKEEN

Rakennusosan tekninen käyttöikä tarkoittaa käyttöönoton jälkeistä ajanjaksoa, jolloin rakennusosan tekniset käyttövaatimukset täyttyvät. Käyttöiät vaihtelevat toisiinsa nähden muun muassa rakennusmateriaalin, käyttöolosuhteiden ja rakennuksen rasitusluokan mukaan, ja sen kuluttua umpeen osa on tarkoituksenmukaista korvata uudella. Tekninen käyttöikä on yleistävä, sillä se perustuu käytössä oleviin tietoihin ja kokemuksiin kestävydestä. (RT 18-10922, 1.)

Rakennuksen suunnitellulle käyttöiälle ei kiinteistöalalla puolestaan ole käytössä yhtenäisiä ohjeistuksia. Rakennuksen ikä R arvioidaankin kokemuksen perusteella tapauskohtaisesti kokemuseräisen tiedon ja rakennuksen suunnitellun käyttöiän pohjalta. (RT 18-10922, 1–2.) Käyttöiän arviointiin voitaisiin tosin käyttää ISO 15686-1 -standardia, joka osoittaa kerroinmenettelyn sen arvioimiseksi. Arviointi perustuu kaavaan, jossa huomioidaan vertailukäyttöikä sekä rakenneosien, työn ja suunnittelun laatu, sisäympäristö, ulkoinen ympäristö sekä huollon taso. Laskenta on kuitenkin usein mahdotonta puutteellisten tietojen, kuten vertailukäyttöiän, vuoksi. (Häkkinen et al. 2001, 13, 23.)

Taulukossa 3 on esitetty joidenkin ulkoseinämateriaalien arvioituja teknisiä käyttöikäjä ja huoltovälejä, kun rasitusluokka on kaksi eli normaali. Käyttöiän kohdalla oleva R tarkoittaa, että materiaalin arvioidaan kestävänsä koko rakennuksen iän verran.

Taulukko 3: Ulkoseinämateriaalien keskimääräisiä käyttöikä (RT 18-10922, 6–7).

Materiaali	Keskimääräinen tekninen käyttöikä (vuotta)	Huoltoväli (vuotta)
Hirsipinta	R	5–20 (huoltomaalaus) 20 (hirsiliitosten tilkitseminen, hirsien päiden uusiminen tarpeen mukaan)
Lautaverhous	50	5–20 (huoltokäsittely)
Tiiliverhous	R	25 (saumakorjaus)
Pinnoittamaton betoni	40	15 (elementtisaumojen uusiminen)
Luonnonkivi	R	25 (saumaus)
Rappaus	50	10–20 (huoltomaalaus)

Kuten taulukosta voidaan havaita, hirsi, tiiliverhous ja luonnonkivi ovat ulkoseinämateriaaleja, jotka kestävät rakennuksen arvioidun käyttöiän verran. Tokikaan julkisivumateriaalin käyttöikä ei kerro rakennuksen varsinaisesta käyttöiästä, sillä julkisivu on remontoitavissa. Vaihtamisesta aiheutuu kuitenkin kasvihuonekaasupäästöjä uuden materiaalin ja remontoinnin vuoksi, mikä vaikuttaa rakennuksen hiilijalanjälkeen. Julkisivuremontista aiheutuu myös kustannuksia, jotka tosin ovat suhteellisen pieniä. Esimerkiksi tämän työn puuverhoillun tyyppitalon julkisivuremontti tulisi maksamaan noin 4000 euroa (Suomi rakentaa 2013a).

Tässä työssä tyyppitalon käyttöikä on käytetty 50 vuotta, jota käytetään usein vastaavissa laskelmissa. Todellisuudessa hirsitalon käyttöikä voi olla jopa yli sata vuotta. Käyttöikää arvioitaessa on otettava huomioon, että esimerkiksi maanvaraisen betonilattian käyttöikä pidetään 50 vuotta (Rakennusteollisuus RTT et al. 2012, 5), mikä asettaa rajoitteita myös koko rakennuksen käyttöiälle, tai ainakin aiheuttaa mittavan remontin.

3.1 Laskennassa käytettävä tyyppitalo

Motiva (2013) on käyttänyt lämmitysvaihtoehtojen vertailulaskurissaan esimerkkitaloa, jonka pinta-ala on 150 neliometriä. Tämän työn esimerkkitalon pinta-alana on käytetty tätä arvoa. Huonekorkeutena on käytetty 2,6 metriä, joka ylittää Suomen rakentamismääräyskokoelma G1:n (2005, 5) asettaman minimihuonekorkeuden 2,5 metriä. Rakentamismääräyskokoelma D5:n (2007, 2) mukaan rakennustilavuus lasketaan rakennuksen ulkoseinien ulkopinnan, alapohjan alareunan ja yläpohjan yläreunan rajoittaman alan mukaan. Kun alapohjan paksuus on 280 mm ja yläpohjan korkeus 545 mm, saadaan esimerkkitalon tilavuudeksi 513,75 kuutiometriä. Laskennan helpottamiseksi talo on yksikerroksinen ja muodoltaan suorakaide.

Suomen rakentamismääräyskokoelman C3:n (2008, 8) mukaan ikkunapinta-alan vertailuarvo on 15 % rakennuksen maanpäällisten kerrosten kerrostasoalojen summasta, mikä esimerkkitalon tapauksessa tarkoittaa 25,5 neliometriä. Ikkunoissa oletetaan olevan neljä lasikerrosta, joiden paksuus on 4 mm. Ikkunoiden U-arvo eli lämmönläpäisykerroin on 0,76 W/m²K (Tiivi) ja ulko-ovien 0,8 W/m²K (Jeld Wen).

Perustusten pohjalla on käytetty 30 cm:n paksuista kerrosta kevytsoraa. Sen päälle on valettu raudoituksen sisältävä paaluantura, joka sisältää raudoitusta 70 kg/m³. Tämän päälle on muurattu betoniharkkoja, joiden korkeus on 190 mm ja pituus 390 mm. Maanpäällisellä osalla on eristeenä polystyreeniä (EPS), jonka tiheys on 40 kg/m³.

Esimerkkitalon alapohjana on käytetty maanvaraista betonilattiaa. Siinä kapillaarinen nousu on estetty perustusten päälle laitetulla märkäreulotulla sepelillä, jonka raekoko on 16–32 mm, ja jota on suositusten mukaisesti 30 cm:n paksuisesti. Tämän päällä on 150 mm paksuinen kerros myös perustuksissa käytettyä EPS-polystyreeniä, mikä vastaa U-arvoltaan Rakentamismääräyskokoelma C3:ssa asetettua minimivaatimusta 0,25 W/m²K. (Sisäilmäyhdistys.) Eristyksen päällä on 100 mm paksuinen betonilaatta, joka sisältää raudoitusta 12 kg/m² (Rakennusteollisuus RTT et al. 2012, 6). Päälimmäisenä kerroksena on parkettilattia, jonka käyttöikä on käytetty Rakennusteollisuuden kortistossa annettua 25 vuotta. Alapohjan U-arvona käytetään Rakentamismääräyskokoelma C3:ssa (2008, 7) annettua vertailuarvoa 0,16 W/m²K.

Puu- ja kivitalon väliseinät on rakennettu käyttäen kertopuisia 39x66 mm tolppia, joiden tolppajako eli koolausväli on 600 mm. Molemmiin puolin eristettä ovat 13 mm:n paksuiset kipsilevyt. Tällöin väliseinän paksuudeksi saadaan 92 mm, joka on yleinen väliovien karmivahvuus (Suomi rakentaa 2013b).

Yläpohja on tuulettuva. Sen katteena on sinkittyä ja maalattua terästä, jonka paksuus on 0,5 mm ja jonka aluslevynä on 15 mm paksuinen vanerilevy. Kattokannattajat ovat koolattu 900 mm:n välein, ja niiden paksuus on 21 mm ja leveys 70 mm. Eristeenä on 400 mm puhallettua selluvillaa sekä 100 mm selluvillalevyä. Höyrynsulkuna on 10 mm:n paksuinen kerros bitumikermiä, jonka alla on harva laudoitus. Laidoituksen koolausväli on 300 mm, paksuus 22 mm ja leveys 200 mm. Siinä on kiinni 13 mm:n paksuinen kipsilevy. Jos eristeet olisivat lasivillaa, olisi yläpohjan U-arvo 0,08 W/m²K (Isover). Koska selluvillan lämmönjohtavuuskerroin on riippumattoman laboratorion testeissä todettu hieman lasivil- laa pienemmäksi (Werro Wool), on selluvillalla eristetyn yläpohjan U-arvo vähintäänkin yhtä hyvä.

3.1.1 Hirrestä rakennettu tyyppitalo

Vaikka nykyään joissain hirsitalossa käytetään lisäeristystä, niin tämän työn tyyppitalossa niin ei ole tehty. Sen sijaan hiilijalanjälki on laskettu kahdelle eri paksuiselle hirsiseinälle: 180 mm:n sekä 270 mm:n paksuiselle hirsiseinälle. Hirren paksuus 180 mm on minimipaksuus, jolla voidaan täyttää Rakentamismääräyskokoelma C3:ssa annetut U-arvot (Alasaarela 2008a, 3). Ohuempi hirsiseinä on U-arvoltaan 0,60 W/m²K ja paksumpi hirsiseinä 0,40 W/m²K (Behm ja Häkkinen 2010, 33). Hirsitalossa myös väliseinät on tehty hirrestä. Näiden paksuudeksi on valittu 92 mm, aiemminkin mainitun yleisen ovikarmien paksuuden vuoksi.

3.1.2 Puusta rakennettu tyyppitalo

Runkomateriaalina on käytetty puuta, ja runkorakenteena on yksinkertainen perusrunko, jossa koolausväli on 600 mm (Gyproc 2008, 12). Tolppakoko on sama kuin lämpöeristyk- sen paksuus.

Ulkoseinän uloimpana osana on 28 mm paksu lautaverhoilu, mikä täyttää RT-8210820:n suosituksen. Tämän jälkeen on 22 mm:n paksuinen tuuletusrako, jossa kulkee 22x100

mm:n pystyauuditus, jonka koolausväli on 600 mm. Seuraavana on 55 mm:n tuulensuoja-
vuorivillaeristys, jota seuraa 175 mm vuorivillaa, jonka tiheys on 35 kg/m^3 . Vuorivillan
kanssa samassa ”kerroksessa” on puurunko, jonka tolpat ovat leveydeltään 50 mm ja pak-
suudeltaan 175 mm. Tämän jälkeen on 10 mm:n paksuinen bitumikermillä tehty höyryn-
sulku, jonka jälkeen on vielä 50 mm vuorivillaa, jossa kulkee koolaus. Lähimpänä sisäsei-
nää on 13 mm:n paksuinen kipsilevy. Tällaisen ulkoseinärakenteen U-arvo on $0,13 \text{ W/m}^2\text{K}$
(Paroc).

3.1.3 Kivitalo

Kivestä tehdyn tyypitalon ulkoseinä on verhoiltu luonnonkivellä, jonka paksuus on 120
mm. Seuraavaksi on 30 mm:n levyinen ilmarako, jonka jälkeen on 55 mm:n paksuinen
kerros tuulensuojavuorivillaeristettä. Tämän jälkeen on eristeenä 175 mm vuorivillaa, jon-
ka tiheys on 35 kg/m^3 . Kantavana rakenteena on 130 mm:n paksuisista poltetuista tiilistä
muurattu seinä, ja lähimpänä sisäseinää on jälleen 13 mm oleva kipsilevy. Rakenteen U-
arvoksi saadaan $0,14 \text{ W/m}^2\text{K}$. (Paroc 2013, 20; Kestävä Kivitalo.)

3.2 Rakentamis- ja käyttövaihe

Tässä kappaleessa on käsitelty kahta erilaista arviointipalvelua, jolla voidaan laskea raken-
tamisvaiheesta aiheutuvat kasvihuonekaasupäästöt. Lisäksi on selvitetty, kuinka rakennuk-
sen käytönaikaista energiankulutusta voidaan arvioida.

3.2.1 ILMARI-arviointipalvelu

ILMARI on VTT:n kehittämä arviointipalvelu, jonka avulla voidaan laskea hiilijalanjälki
suunniteltavalle rakennukselle. Se keskittyy kasvihuonekaasupäästöjen osalta merkittä-
vimpiin rakenneosiin, kuten perustuksiin, rakennusrunkoon, julkisivuihin ja seiniin. Ra-
kennetyyppejä määritettäessä nähdään sen hiilijalanjälki neliometriä tai kuutiota kohden.
Ohjelman suorittamaa laskentaa varten ladataan määräluettelo, joka on tehty joko manuaa-
lisesti tai IFC-mallista. Tulokset raportoidaan luettelona, josta nähdään rakennusosakohtai-
nen määrätieto ja hiilidioksidiekvivalenttimäärä. Luettelon lopussa on koko rakennuksen
yhteenlaskettu hiilijalanjälki sekä kerrosalaa ja tilavuutta kohden lasketut tulokset. (Häkki-
nen 2011, 1.)

ILMARI-palvelun hiilijalanjälkien arvioinnissa tuotesysteemin elinkaaren taustatietokantaan on sisällytetty tuotteen valmistus, sen kuljettaminen loppukäyttäjälle, materiaalihukka sekä tuotteen uusiminen rakennuksessa sen arvioidun käyttöiän aikana. Kuljetusmatkat ja -välineet on arvioitu karkeasti kyseessä olevien tuotteiden keskimääräisten kuljetusmatkojen perusteella, minkä seurauksena esimerkiksi Pohjois-Suomeen rakennettaessa arvioissa on merkittävä suhteellinen virhe. Valmistajalta käyttäjälle tapahtuvan kuljetuksen osuuden rakennuksen hiilijalanjäljestä on kuitenkin arvioitu olevan vain noin 5 %. Työmaalla tapahtuva hukka on arvioitu VTT:n ja tuottajien yhteistyössä REM-hankkeessa tehtyjen arvioiden perusteella. Tuotteen käyttöikä otetaan huomioon rakennetyyppejä määritettäessä, jolloin käyttäjä syöttää sen arvon itse. (Häkkinen 2011, 3.) Tässä työssä tyyppitalon rakennusosien käyttöiät on katsottu RT 18-10922 -kortista.

Rakennusosien hiilijalanjäljet pohjautuvat pääasiassa RT-ympäristöselosteisiin. Niiltä osin kun tämä ei ole ollut mahdollista, on käytetty muuta, pääosin julkista, tietoa, joka on hankittu erilaisista hyvälaatuisista tietokannoista. Muutamien tuotteiden kohdalla arvio perustuu VTT:n suomalaiselle yritykselle laatimaan elinkaariarvioon, jonka käyttöön on saatu lupa. Kuljetuksien hiilidioksidipäästöjen arviointiin on käytetty VTT:n ylläpitämän LI-PASTO-tietokannan tietoja yksikköpäästöistä. (Häkkinen 2011, 4.) Alla olevassa taulukossa 4 on listattu tässä työssä käytettyjen rakennusmateriaalien hiilijalanjälkien arvioinnin tietolähteet.

Taulukko 4: Käytettyjen materiaalien hiilijalanjälkien tietolähteet (Häkkinen 2011, 4).

Materiaali	Hiilijalanjäljen tietolähde
Betoni ja betonituotteet	RT-ympäristöselosteet
Sahatavara ja laudoitus	RT-ympäristöselosteet
Hirsiseinä	VTT:n tekemä HIRSI-työkalu Pudasjärvelle (270 mm paksuisen hirren elinkaariarvio)
Kierrätyspaperista valmistettu eriste	RT-ympäristöselosteet
EPS-eriste (polystyreeni)	APME:n tiedot polystyreenin valmistuksen ympäristöprofiilista
Vuorivilla	RT-ympäristöselosteet
Bitumikatteet	Bitumin Water Proofing Assosiation:n julkaisemat tiedot
Parketti	VTT:n laatima työkalu parkettien valmistuksesta (ei-julkinen)
Kipsilevy	RT-ympäristöselosteet
Vaneri	RT-ympäristöselosteet
Maalit	VTT:n julkaisu 834 (arvio maalien ympäristövaikutuksista)
Muuraus poltetusta tiilestä	BSRIA:n ohje Embodied Carbon
Luonnonkivi	VTT:n laatima, ei-julkinen työkalu (arvio tehty hiotulle graniittilaatalle)
Murske, sora ja hiekka	ELCD:n tiedot
Lasit ja ikkunat	VTT:n tekemä arvio, jonka pohjana on käytetty mm. valmistamisen energiankulutus-tietoja

3.2.2 Synergia-laskuri

Suomen Ympäristökeskus on kehittänyt hiilijalanjälkilaskurin, jonka nimi on SYNERGIA-laskuri päärakenteiden hiilijalanjäljelle. Se on Excel-pohjainen ohjelma, jossa käyttäjä syöttää siihen käyttämiensä päärakenteisiin kuuluvien materiaalien ominaisuudet eli tilavuuspainon, aiheutuvat kasvihuonekaasupäästöt kiloa kohden sekä tilavuuden, jota materiaalia kuluu. Laskuriin voidaan syöttää myös materiaalin varastoima hiilidioksidi hiilidioksidiekvivalenttikiloina. Rakennusmateriaalien ominaisuuksia löytyy laskurin mukana tulevasta liitetiedostosta. (Nissinen & Rintala 2010, 1–2.)

Rakennusmateriaalien ominaisuuksia sisältävässä liitetiedostossa suurin osa tiedoista pohjautuu ILMARI-laskurin tavoin RT-ympäristöselosteisiin. Liitteessä ei kuitenkaan ole listattu ominaisuuksia hirrelle, kivelle, eikä puuverhoilulle. (Nissinen & Rintala 2010, 5.) Nämä tiedot on mahdollista syöttää laskuriin itse, ja esimerkiksi hirren osalta näin pitäisi saada aikaan sama tulos kuin ILMARI-laskurilla, sillä luotettavin tieto hirren ominaisuuksista olisi myös ILMARI-ohjelman taustatietona olleen VTT:n tuottama tutkimusmateriaali.

Voidaan katsoa, että molemmat ohjelmista ovat käyttökelpoisia rakennuksen hiilijalanjäljen arviointiin: kumpikaan ohjelma ei ota huomioon kaikkia rakennusmateriaaleja ja niiden avulla pystyy vertailemaan eri rakennetyyppien aiheuttamia eroja rakennuksen hiilijalanjälkeen. ILMARI on käyttäjäystävällisempi, sillä se vaatii huomattavasti vähemmän manuaalista tiedon syöttämistä ja siihen on tallennettuna huomattavasti SYNERGIA-ohjelmaa enemmän taustatietoa. Toisaalta, SYNERGIA-ohjelmaan on helppo lisätä haluamiaan rakennusmateriaaleja kunhan niiden ominaisuudet ovat saatavilla jostain luotettavasta lähteestä.

3.3.3 Energiankulutuksen ja kunnossapidon päästöt

Rakennuksen energiankulutuksella on huomattava vaikutus rakennuksen hiilijalanjälkeen, sillä energiantuotanto aiheuttaa kasvihuonekaasupäästöjä jatkuvasti. Suurin vaikutus on lämmityksellä, joka aiheuttaa noin puolet pientalojen energiankulutuksesta (Motiva 2014b). Lämmitykseen kuluvan energian määrittämiseksi on eri talotyypeille laskettava

kuukausittaiset johtumislämpöhäviöt. Ne saadaan laskettua kaavalla Rakennusmääräyskoelma D5:stä (2007, 15) löytyvällä yhtälöllä 1.

$$Q_{joht} = Q_{ulkoseinä} + Q_{yläpohja} + Q_{alapohja} + Q_{ikkuna} + Q_{ovi} \quad (1)$$

jossa

Q_{joht} johtumislämpöhäviö, kWh

$Q_{ulkoseinä}$ johtumislämpöhäviö ulkoseinän läpi, kWh

Rakennuksen ulkoilmaan rajoittuvien rakenneosien lämpöhäviöt lasketaan Rakennusmääräyskoelma D5:stä (2007, 16) löytyvällä yhtälöllä 2.

$$Q_{rakosa} = \sum U_i A_i (T_s - T_u) \Delta t / 1000 \quad (2)$$

jossa

Q_{rakosa} johtumislämpöhäviö rakennusosan läpi, kWh

U_i rakennusosan lämmönläpäisykerroin, W/m²K

A_i rakennusosan pinta-ala, m²

T_s sisäilman lämpötila, °C

T_u ulkoilman lämpötila, °C

Δt tarkasteltavan ajanjakson pituus, h

1000 kerroin, jolla saadaan tulos kilowattitunteina

Alapohjien johtumislämpöhäviöt lasketaan myös yhtälöllä 2, mutta koska esimerkkirakennusten alapohjat ovat maanvaraisia, käytetään niiden johtumislämpöhäviöiden laskemiseen ulkolämpötilan sijasta alapohjan alapuolisen maan lämpötilaa. Keskimääräiset lämpötilat eri kuukausille löytyvät Ympäristöministeriön (2013, 20) laadintaesimerkistä. Kuukausittaiset keskilämpötilat II-vyöhykkeellä, johon Lappeenrantaakin kuuluu, ovat listattuina Ra-

kentamismääräyskokoelma D3:ssa (2011, 30). Alla olevassa taulukossa 5 on esitetty kuukausittaiset keskimääräiset ulkolämpötilat sekä maan lämpötilat.

Taulukko 5: Kuukausien keskimääräiset maapohjan ja ulkolämpötilat.

Kuukausi	Ulkolämpötila [°C]	Maan lämpötila [°C]
Tammikuu	-3,97	10,57
Helmikuu	-4,5	9,57
Maaliskuu	-2,58	8,57
Huhtikuu	4,5	7,57
Toukokuu	10,76	7,57
Kesäkuu	14,23	8,57
Heinäkuu	17,3	10,57
Elokuu	16,05	11,57
Syyskuu	10,53	12,57
Lokakuu	6,2	13,57
Marraskuu	0,5	13,57
Joulukuu	-2,19	12,57

Rakennukseen vuotavan ilman lämmittämiseen tarvittava energia lasketaan yhtälöllä 3, joka löytyy Rakentamismääräyskokoelma D5:stä (2007, 19).

$$Q_{vuotoilma} = \rho_i c_{pi} q_{v,vuotoilma} (T_s - T_u) \Delta t / 1000 \quad (3)$$

jossa

ρ_i	ilman tiheys, 1,2 kg/m ³
c_{pi}	ilman ominaislämpökapasiteetti, 1000 J/(kgK)
$q_{v, vuotoilma}$	vuotoilmavirta, m ³ /s

Yhtälössä 3 tarvittava vuotoilmavirta lasketaan yhtälöllä 4.

$$q_{v, vuotoilma} = \frac{q_{50}}{3600x} A_{vaippa} \quad (4)$$

jossa

q_{50}	rakennusvaipan ilmanvuotoluku, m ³ /(hm ²)
x	kerroin, joka on yksikerroksisille rakennuksille 35
A_{vaippa}	rakennusvaipan pinta-ala alapohja mukaan luettuna, m ²
3600	kerroin, jolla muutetaan ilmavirta yksiköstä m ³ /h yksikköön m ³ /s

Ilmanvuotoluvun q_{50} arvona on käytetty 3 m³/hm², joka on pientalojen tyypillinen ilmanvuotoluku, kun ilmanpitävyyden huomiointi rakennus- ja suunnitteluvaiheessa on ollut hyvän ja keskinkertaisen välillä. Kerroin x on yksikerroksisille taloille 35. (D5 2007, 20). Tyypitalon vaipan ala on 471 m². Myös vuotoilman lämmitykseen tarvittava energia lasketaan kuukausikohtaisesti hyödyntäen taulukossa 4 annettuja kuukausittaisia keskilämpötiloja.

Tässä työssä ei ole laskettu tarkasti ilmanvaihdon aiheuttamaa sähkönkulutusta, sillä tarkkoja ilmanvaihdon ilmamääriä ei ole määritetty. Arvona on käytetty pinta-alaltaan 150 m² olevan Jyväskylässä sijaitsevan omakotitalon ilmanvaihtoon kuluva sähkönkulutusta, joka on noin 4500 kWh vuodessa (Vallox 2010, 11). Todellisuudessa kulutus saattaa olla aavistuksen pienempi, sillä Rakentamismääräyskokoelma D3:n (2012, 29) mukaan Jyväskylä sijaitsee viileämmällä III-vyöhykkeellä. Lappeenranta puolestaan sijaitsee hieman keski-

lämpötiloiltaan lämpimämmällä II-vyöhykkeellä, jolloin ulkoa tulevaa raitisilmaa ei joudu lämmittämään aivan yhtä paljoa sähköisellä jälkilämmitysvastuksella. Ero on kuitenkin tämän työn laskennan kannalta mitätön.

3.3 Hiilivarasto

CEN/TC 350 -standardissa, joka on pohjana Green Building Council Finlandin laskentaohjeelle, rakennukseen sitoutunutta hiiltä ei saa ottaa huomioon hiilijalanjälkeä laskettaessa (GBC Finland 2013, 40). Mikäli rakennuksen hiilijalanjälkeä laskettaisiin British Standards Institutionin, Carbon Trust:n ja Defra:n laatiman PAS (Publicly available specification) 2050 -ohjeistuksen ”Specification for the assessment of the life cycle greenhouse gas emissions of goods and service” mukaan, voitaisiin hiilinielu ottaa huomioon. Ohjeistuksen perusteella sitoutunut hiili huomioidaan, mikäli yli puolet tuotteeseen sitoutuneesta hiilestä on poissa ilmakehästä vähintään yhden vuoden tuotteen valmistamishetkestä alkaen. Tuotteen hiilijalanjäljestä vähennettävä määrä määritellään painokertoimella, johon vaikuttavat tuotteen käyttöikä sekä osuus, joka hiilestä on sitoutuneena käyttöiän lopussa. Hirsitalon, jonka käyttöikä on 50 vuotta, painokerroin on 0,5. Hiilijalanjäljestä voidaan vähentää painokertoimella kerrottu varastoituneen hiilidioksidin määrä, eli tässä tapauksessa puolet. (Behm ja Häkkinen 2010, 6.)

Hiilivarastoa voidaan käyttää hirsirakennusten U-arvon kompensoimiseen. Kompensoinnissa tarkastellaan, kuinka paljon lämpöä voidaan tuottaa kaukolämmöllä ennen kuin energiantuotannon päästöt ylittävät hirsiseinän sitoman hiilidioksidiekvivalenttimäärään. Jos U-arvon kompensoinnissa otetaan huomioon PAS2050 -ohjeistus, riippuu U-arvo rakennuksen käyttöiästä. Tämä energiamäärä, jota voidaan ajatella päästöttömänä, on jaettu rakennuksen käyttöiälle ja selvitetty osuus, jonka energia kattaa rakennuksen energiankulutuksesta. PAS2050 -ohjeistukseen perustuvalla kompensointitavalla U-arvon muutos on 5–17 % hirren paksuudesta riippuen. (Behm ja Häkkinen 2010, 32.)

Mikäli kompensointiin ei käytetä PAS2050 -ohjeistusta, on U-arvon muutos 9–37 % hirren paksuudesta ja käyttöiästä riippuen. Tämä kompensointityyli auttaa hahmottamaan paremmin hiilivaraston merkittävyyttä käyttövaiheen energiankulutuksen kannalta. Tällä laskentatavalla 50 vuoden käyttöiällä hirren, jonka paksuus on 180 mm, U-arvo on 0,50 W/m²K ja 270 mm paksun hirren 0,25 W/m²K. PAS2050 -ohjeistusta noudattaen ohuem-

man hirren kompensoitu U-arvo on $0,55 \text{ W/m}^2\text{K}$ ja 270 paksunnan hirren $0,33 \text{ W/m}^2\text{K}$. (Behm ja Häkkinen 2010, 32–33.)

3.4 Purkuvaiheen vaikutus

Rakennuksen purkuvaiheesta syntyy päästöjä sen purkamisesta, purkujätteen kuljettamisesta ja käsittelystä sekä purkujätteen loppusijoituksesta. Tässä työssä purkuvaiheen päästöt on laskettu Green Building Council Finlandin (2013, 36) ohjeistuksen mukaisesti arvolla $20 \text{ kg CO}_2\text{-ekv/brm}^2$. Tällöin purkuvaiheen kasvihuonekaasupäästöiksi saadaan $3000 \text{ kg CO}_2\text{-ekv}$. Ruuskan (2013, 33) esimerkkitalon purkutöihin on kulunut energiaa $16,3 \text{ GJ}$ eli $1300 \text{ kg CO}_2\text{-ekvivalenttia}$. Energiämäärä sisältää nosturit, ajettavat välineet, moottorisahat ja kuluneen sähkön, mutta siinä ei ole huomioitu jätteiden työmaalajittelua, eikä purkujätteenkäsittelystä syntyviä päästöjä. Mikäli ne olisi huomioitu, saattaisivat päästöt olla lähempänä GBC Finlandin ohjeistuksen mukaisesti arvioituja purkuvaiheen päästöjä.

Jos ajatellaan kuljetusmatkan hirsitalon rakennusjätteen käsittelypaikkaan olevan 50 kilometriä, syntyy päästöjä VTT:n LIPASTO-tietokannan perusteella laskettuna noin $1000 \text{ kg CO}_2\text{-ekvivalenttia}$ (Ruuska 2013, 31). Ruuska on laskenut työssään, että hirsirakenteisen talon purkujätteen kuljettamisesta aiheutuu päästöjä hieman vähemmän, $800 \text{ kg CO}_2\text{-ekvivalenttia}$. Tämä on selitettävissä sillä, että kyseisissä laskelmissa hirsitalojen alapohja on ollut erilainen kuin vertailupuutalon, jonka alapohja on ollut kaksi vertaa niin painava kuin hirsitalojen. (Ruuska 2013, 20;32). Tässä työssä on päädytty käyttämään arvoa $1000 \text{ kg CO}_2\text{-ekvivalenttia}$, sillä Ruuskan vertailupuutalon alapohja muistuttaa tämän työn tyyppitalojen alapohjia. Koska tässä työssä hirsitalojen alapohjarakenne ei poikkea puutyypitaloista, voidaan näiden talojen purkujätteen kuljettamisesta aiheutuvien päästöjen ajatella olevan samaa luokkaa. Kivitalon purkujätteen kuljetuksesta aiheutuisi suuremmat päästöt, sillä kivi ja kivitalon runkomateriaalina käytetty tiili ovat hirttä ja puuta painavampia materiaaleja.

4 HIILIJALANJÄLJEN ARVIOINTIA

Tässä luvussa on laskettu rakentamisesta aiheutuva hiilijalanjälki ILMARI-laskentaohjelmaa käyttäen ja on kokeiltu SYNERGIA-ohjelmaa. Tämän lisäksi on laskettu käyttöiän aikana energiankulutuksesta aiheutuneet hiilidioksidipäästöt edellisessä luvussa osoitetulla tavalla ja huomioitu tyyppitalon rakenteisiin sisältynyt energia. Lopuksi on arvioitu eri talotyyppien hiilijalanjälkiä ja pohdittu erojen aiheuttajia sekä sitä, miten hirsitalon hiilijalanjälkeä voisi parantaa.

4.1 Hiilijalanjäljen laskenta

Tässä osiossa on laskettu eri hiilijalanjälkeen vaikuttavia osa-alueita edellisessä luvussa osoitetuilla tavoilla.

4.1.1 Rakentamisvaihe

Alla olevassa taulukossa 6 on esitettyä ILMARI-laskentaohjelmalla laskettu hiilijalanjälki tyyppitalolle, kun seinämateriaalina on käytetty 180 mm:n paksuista hirttä.

Taulukko 6: 180 mm:n paksuisesta hirrestä rakennetun hirsitalon rakentamisvaiheen päästöt.

Rakennusosa	Hiilidioksidipäästöt m ² /m ³ kohden [CO ₂ -ekv/m ²]	Pinta-ala tai tilavuus [m ² /m ³]	Hiilidioksiequivivalentti- päästöt [kg CO ₂ -ekv]
Aluerakenteet	20	204	4039
Antura	408	10 m ³	4080
Betoniharkot	350	7 m ³	2555
Alapohjan eristys	136	28 m ³	3830
Alapohja	67	150	10 107
Hirsiseinä 180 mm	7	130	866
Yläpohja	36	150	5427
Ikkunat	27	26	696

Sisäovet	35	13	461
Ulko-ovet	192	4	844
Väliseinät	3	88	298
Lattiapinta	9	140	1313
Koko rakennuksen hiilijalanjälki: 34 515 kg CO₂-ekv			
Rakennuksen hiilijalanjälki per pinta-ala: 230 kg CO ₂ -ekv/m ²			
Rakennuksen hiilijalanjälki per tilavuus: 67 kg CO ₂ -ekv/m ³			

Hirsitalo, joka on rakennettu 270 mm:n paksuisesta hirrestä, eroaa ohuemmasta hirrestä rakennetusta talosta vain ulkoseinien paksuudella. Tästä syystä alla olevassa taulukossa 7 on eritelty vain ulkoseinien aiheuttama hiilijalanjälki.

Taulukko 7: 270 mm:n paksuisesta hirrestä rakennetun talon rakentamisvaiheen kasviuonekaasupäästöt.

Rakennusosa	Hiilidioksidipäästöt m ² /m ³ kohden [kg CO ₂ -ekv/m ²]	Pinta-ala tai tilavuus [m ² / m ³]	Hiilidioksidiekvivalentti- päästöt [kg CO ₂ -ekv]
Hirsiseinä 270 mm	10	130	1299
Muut yhteensä			33650
Koko rakennuksen hiilijalanjälki: 34 948 kg CO₂-ekv			
Rakennuksen hiilijalanjälki per pinta-ala: 233 kg CO ₂ -ekv/m ²			
Rakennuksen hiilijalanjälki per tilavuus: 68 kg CO ₂ -ekv/m ³			

Kivi- ja puutalot eroavat hirsitaloista vain ulko- ja väliseinien sekä väliseinien maalipintojen osalta, joten niistäkin on listattu erikseen ainoastaan ulko- ja väliseinien aiheuttamat hiilidioksidipäästöt. Kivitalon rakentamisesta aiheutuva hiilijalanjälki on esitetty taulukossa 8 ja puutalosta aiheutuva hiilijalanjälki taulukossa 9.

Taulukko 8: Kivistä rakennetun talon rakentamisvaiheen kasvihuonekaasupäästöt.

Rakennusosa	Hiilidioksidipäästöt m ² / m ³ kohden [kg CO ₂ -ekv/m ²]	Pinta-ala tai tilavuus [m ² / m ³]	Hiilidioksidiekvivalentti- päästöt [kg CO ₂ -ekv]
Ulkoseinä (kivi)	311	130	40 438
Väliseinä	10	88	871
Maalipinta	0,11	176	19
Muut yhteensä			33 351
Koko rakennuksen hiilijalanjälki: 74 680 kg CO₂-ekv			
Rakennuksen hiilijalanjälki per pinta-ala: 498 kg CO ₂ -ekv/m ²			
Rakennuksen hiilijalanjälki per tilavuus: 145 kg CO ₂ -ekv/m ³			

Taulukko 9: Puurakenteisen talon rakentamisvaiheen kasvihuonekaasupäästöt.

Rakennusosa	Hiilidioksidipäästöt m ² / m ³ kohden [kg CO ₂ -ekv / m ²]	Pinta-ala tai tilavuus [m ² / m ³]	Hiilidioksidiekvivalentti- päästöt [kg CO ₂ -ekv]
Ulkoseinä (puu)	35	130	4542
Väliseinä	10	88	871
Muut yhteensä			33 371
Koko rakennuksen hiilijalanjälki: 38 784 kg CO₂-ekv			
Rakennuksen hiilijalanjälki per pinta-ala: 259 kg CO ₂ -ekv/m ²			
Rakennuksen hiilijalanjälki per tilavuus: 75 kg CO ₂ -ekv/m ³			

Ohjelmien vertailtavuuden vuoksi SYNERGIA-laskurilla on laskettu kivitalon ulkoseinän hiilijalanjälki niiltä osin, kuin se on ollut liitetiedostossa annettujen ominaisuuksien avulla mahdollista. ILMARI-ohjelmalla lasketun kiviseinän rakennusmateriaaleja vastaavia materiaaleja löytyi SYNERGIA-ohjelmasta vuorivilla, poltettu savitiili sekä kipsilevy. Näillä tiedoilla laskettu hiilidioksidiekvivalenttimäärä löytyy taulukosta 10.

Taulukko 10: SYNERGIA-ohjelmalla lasketut kiviseinän rakentamisvaiheen aiheuttamat kasvihuonekaasupäästöt.

Materiaali	Tilavuus-paino [kg/m ³]	CO₂-ekv-päästöt [g CO ₂ -ekv/kg]	Tilavuus pinta-alaa kohden [dm ³]	Paino (laskettu automaattisesti) [kg]	Hiilijalanjälkipäästöt [kg CO ₂ -ekv]
Vuorivilla	35	990	175	6,125	6,06
Poltettu savitiili	1300	220	130	196	37,18
Kipsilevy	11,7	390	13	0,1521	0,059
Rakennetyypin hiilijalanjälki neliometriä kohti: 45 kg CO ₂ -ekv					
Rakennetyypin hiilijalanjälki yhteensä, kun rakennetyyppiä 152 m ² : 6872 kg CO₂-ekv					

Vastaavilla tiedoilla ILMARI-ohjelmalla laskeminen antaa tulokseksi 52,94 CO₂-ekv kg neliometriä kohden ja koko seinäalan hiilijalanjäljeksi 8046 kg CO₂-ekv. Laskureiden tulokset siis poikkeavat jonkin verran toisistaan. Osittain tämä on selitettävissä sillä, että ILMARI-ohjelmassa on käytetty poltetun tiilen tietolähteenä BSRIA:ta, kun taas SYNERGIA-ohjelmassa on käytetty Wienerberger Oy:n materiaaleja.

4.1.2 Käyttövaihe

Taulukossa 11 on esitetty eri talotyyppien johtumislämpöhäviö, vuotoilman lämmittämiseen kuluva energia, ilmanvaihdon kuluttama energia sekä lämmitysenergian tarve yhteensä. Lämpöhäviöitä laskettaessa ei ole otettu huomioon kylmäsiltojen aiheuttamaa johtumis-

ta. Taulukkoon on laskettu myös paljonko hirsitalojen johtumislämpöhäviöt olisivat, mikäli ne olisivat laskettu hirrelle Behmin ja Häkkisen (2010, 33) annettujen hiilinielulla kompensoitujen U-arvojen mukaisesti, jotka ovat 180 mm:n paksuiselle hirrelle $0,5 \text{ W/m}^2\text{K}$ ja 270 mm:n paksuiselle hirrelle $0,25 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Kappaleessa 3.3.3 esitetyillä arvoilla ja yhtälöllä 4 laskettuna saadaan kaikkien tyyppitalojen vuotoilman lämmittämiseen tarvittavaksi energiaksi 1760 kWh.

Taulukko 11: Eri talotyyppien lämmitysenergioiden tarpeet.

Talotyyppi	Johtumislämpöhäviöt Q_{joht} [MWh]	Vuotoilman lämmittäminen [MWh]	Ilmanvaihto [MWh]	Yhteensä [MWh]
Puutalo	10,114	1,76	4,5	16,374
Kivitalo	10,287	1,76	4,5	16,547
Hirsitalo 180 mm:n hirrestä / kompensoidulla U-arvolla laskettuna	18,260 / 16,527	1,76	4,5	24,52 / 22,782
Hirsitalo 270 mm:n hirrestä /kompensoidulla U-arvolla laskettuna	14,793 / 12,193	1,76	4,5	21,053 / 18,453

Lämmitystehon tarvetta laskiessa ei ole otettu huomioon ilmanvaihdon kautta tulevan tuuloilman lämmityksen tarvetta, eikä ihmisten aiheuttamaa lämpökuormaa ole vähennetty kokonaislämmöntarpeesta.

Vuonna 2011 keskimääräisessä suomalaisessa neljän hengen sähkölämmitteisessä omakotitalossa kului sähköä valaistukseen, elektroniikkalaitteiden käyttöön ja veden lämmittämiseen yhteensä 10 000 kWh (Motiva 2011, 42). Tämän työn laskelmissa on käytetty tätä suuntaa-antavaa arvoa.

Motivan (2014) ilmoittama sähkönhankinnan CO₂-kerroin on viiden vuoden liukuvana keskiarvona 223 kg CO₂/MWh. Ruuska (2013, 38) on kuitenkin arvioinut Työ- ja elinkeinoministeriöltä saamiensa tietojen pohjalta seuraavan 50 vuoden sähkönkulutukselle CO₂-ekvivalenttikertoimen, joka on 92 kg CO₂-ekv / MWh. Taulukossa 12 on esitetty eri talotyyppien kokonaissähkönkulutukset sekä niitä vastaavat hiilidioksidiekvivalenttimäärät vuodessa. Lisäksi on esitetty sähkönkulutuksesta syntyvät kasvihuonekaasupäästöt hiilidioksidiekvivalenteina käyttöiän, 50 vuoden, ajalta.

Taulukko 12: Kokonaissähkönkulutukset eri talotyypeille sekä niitä vastaavat CO₂-ekvivalenttimäärät.

Talotyyppi	Yhteensä [MWh]	CO ₂ -ekvivalentteina vuodessa [t CO ₂ -ekv]	CO ₂ -ekvivalentteina 50 vuodessa [t CO ₂ -ekv]
Puutalo	26,374	2,426	121,3
Kivitalo	26,547	2,442	122,1
Hirsitalo 180 mm	34,52	3,175	158,8
Hirsitalo 180 mm, kompensoitu U-arvo	32,782	3,016	150,8
Hirsitalo 270 mm	31,053	2,857	142,8
Hirsitalo 270 mm, kompensoitu U-arvo	28,453	2,618	130,9

Taulukosta voidaan havaita, että kompensoidun U-arvon käyttäminen pienentää käytönai-kaista energiankulutusta ohuemman seinän tapauksessa 5 % ja paksumman seinän tapauksessa 8 %.

Koska tyyppitalojen todellista huolto-ohjelmaa ei ole tiedossa, ovat kunnossapidon kasvihuonekaasupäästöt arvioitu GBC Finlandin (2013, 36) ohjeistuksen arvolla 2 kg CO₂-ekv/brm²/vuosi. Tällöin jokaisen tyyppitalon päästöt 50 vuoden ajalta ovat 15 tonnia CO₂-ekvivalenttia. Tämä on huomioitu myöhemmin hiilijalanjälkiä arvioitaessa.

4.1.3 Purkuvaihe

Kun rakennuksen purkamisesta aiheutuneet päästöt lasketaan edellisessä luvussa esitetyn Green Building Council Finlandin (2013,36) ohjeistuksen mukaisesti arvolla 20 kg CO₂-ekv/bm², saadaan purkamisesta aiheutuviksi kasvihuonekaasupäästöiksi 3000 kg CO₂-ekvivalenttia. Purkujätteen kuljettamisesta kasvihuonekaasuja syntyy 1000 kg CO₂-ekvivalenttia kappaleessa 3.4 esitetyn tavan mukaisesti.

Alasaarelan (2008b, 4) mukaan yhteen 260 mm paksuun hirsiseinäneliömetriin on varastoitunut noin 610 kWh energiaa, joka voidaan hyödyntää rakennuksen purkamisen jälkeen. Tällä perusteella yksi m³ hirttä sisältää käytettävissä olevaa energiaa 2,35 MWh. Hirsitalossa, jonka seinät ovat 180 mm paksut ja jossa hirttä on käytetty 31,5 m³, on sitoutunutta energiaa tällöin 73,9 MWh. Taloon, jonka seinät ovat 270 mm paksut ja jonka hirsien tilavuus on 43 m³, sitoutunut energia on 100,9 MWh.

Ruuskan (2013, 47) tutkimuksen perusteella 270 mm hirrestä rakennetun talon käytettävissä oleva energia on 190 MWh. Laskelmassa on otettu huomioon koko talon sisältämä energiasisältö, eikä pelkästään hirsiosien. Ulkoseinien osuus energiasisällöstä on 40 % ja väliseinien osuus 26 %, jolloin hirsirakenteiden energiasisältö on 125,4 MWh. Vastaavat luvut 180 mm hirrestä rakennetulle talolle ovat 160 MWh ja 105,6 MWh. Puutyyppitalolle ne ovat 48 MWh sekä 8,64 MWh. (Ruuska 2013, 23, 47).

Seiniin varastoituneen hyötyenergian määrä puuseinälle on noin 160 kWh/m² (Alasaarela 2008b, 4). Tällöin puutalon ulkoseinien sisältämä energia on 20,8 MWh. Mielenkiintoista on, että Ruuskan laskelmissa puutalojen ulkoseinät sisältävät energiaa vain 8,64 MWh eli yli kaksi kertaa vähemmän kuin Alasaarelan työssä. Kumpikaan yllä mainituista tutkimuksista ei osoita tapaa, jolla energiasisältö on määritelty. Tässä työssä on päädytty käyttämään Alasaarelan käyttämiä arvoja, sillä ne ovat helpommin sovellettavissa tähän työhön. Ruuskan (2013, 23) talo on 141 m² eli lähes samankokoinen tässä työssä käytetyn tyyppitalon kanssa, mutta se poikkeaa tyyppitalosta jonkin verran rakenteeltaan. Koska kivitalon ulkoseinärakenteet eivät sisällä poltettavaa puumateriaalia, ei niistä saada materiaalia energiahöykykyttöön. Todellisuudessa kivitalokin sisältää jonkin verran puuta muun muassa kattorakenteiden vuoksi.

4.1.4 Hiilivarasto

VTT:n raportissa hirsitaloon, jonka seinien paksuus on 180 mm ja hirren määrä 24,3 kuutiota, on sitoutunut hiilidioksidia 18,3 tonnia (Behm ja Häkkinen 2010, 17,23). Tällöin sitoutunutta hiilidioksidia yhtä hirsikuutiometriä kohden on 752 kg. Tyypitalossa, jossa ulkohirsiseinien paksuus on 180 mm, on hirttä väliseinät mukaan luettuna yhteensä 31,5 m³. Vastaavasti talossa, jonka seinät ovat 270 mm paksut, on hirttä yhteensä 43 m³. Tällöin 180 mm:n hirrestä tehty talo on sitonut hiilidioksidia 23,7 tonnia ja 270 mm:n hirrestä tehty talo 32,3 tonnia.

Alasaarelan (2008b, 2–3) mukaan 180 mm paksu hirsiseinä varastoi hiiltä 38,2 kg neliometriä kohden ja 95 mm paksu seinä 20,2 kg neliometriä kohden. Yksi kilo sitoutunutta hiiltä vastaa 3,67 kilogrammaa hiilidioksidia. Näillä arvoilla sitoutuneen hiilidioksidin määräksi saadaan 24,8 tonnia, mikä on lähes sama kuin VTT:n arvoilla laskettaessa. Ero johtuu mahdollisesti väliseinien paksuuden poikkeavuudesta.

Puuseinä sitoo hiilidioksidia noin 45 kg/m² (Alasaarela 2008b, 4), mikä koko tyypitalon osalta vastaa noin 5,85 tonnia. Kivitalo ei sido tätäkään vertaa, sillä siinä on vähemmän puurakenteita kuin muissa tyypitaloissa. Alasaarelan (2008b, 4) mukaan tiiliseinä, joka on samantapainen kivityypitalon ulkoseinän kanssa, sitoo hiilidioksidia vain noin 20 kg/m² mikä tyypitalossa vastaisi 2,6 tonnia.

4.2 Hiilijalanjälki

Alla olevassa taulukossa 13 on esitettyä tiivistelmä edellä esitetystä hiilijalanjälkeen vaikuttavista laskelmista.

Taulukko 13: Hiilijalanjälkeen vaikuttavat laskelmat.

Talotyyppi	Rakentamisen päästöt [t CO₂-ekv/rakennus]	Käytönajan päästöt [t CO₂-ekv/rakennus]	Purkuvaiheen päästöt [t CO₂-ekv/rakennus]	Seiniin varastoitunut energia [MWh/rakennus]
Hirsitalo, 180 mm seinät	34,515	173,8	4	73,9 MWh
Hirsitalo, 270 mm seinät	34,948	157,8	4	100,9 MWh
Puutalo	38,784	136,4	4	20,8 MWh
Kivitalo	74,680	137,8	4	-

Taulukossa 14 on listattu suuntaa-antavat hiilijalanjäljet eri tyyppitaloille, kun on otettu huomioon kaikki edellisessä luvussa lasketut hiilijalanjälkeen vaikuttavat arvot, rakenteiden energiahyötykäyttöä lukuun ottamatta. Hirsitaloista on listattu kompensoimattomalla U-arvolla lasketut talot ja seiniin sitoutunut hiilidioksidi on esitetty erikseen. Viimeisessä sarakkeessa on esitetty hiilijalanjälki, kun PAS 50 -ohjeistuksen mukaisesti siitä on vähennetty puolet sitoutuneen hiilidioksidin määrästä.

Taulukko 14: Suuntaa-antavat hiilijalanjäljet ilman rakenteiden energianhyötykäyttöä.

Talotyyppi	Hiilijalanjälki [t CO₂-ekv/rakennus]	Seiniin sitoutunut CO₂ [t CO₂-ekv/rakennus]	Hiilijalanjälki, kun sitoutunut CO₂ huomioitu [t CO₂-ekv/rakennus]
Hirsitalo, 180 mm seinät	212,3	23,688	200,5
Hirsitalo, 270 mm seinät	196,7	32,336	180,5
Puutalo	179,2	5,850	176,3
Kivitalo	216,48	2,600	215,2

Kuten taulukosta nähdään, jäävät hirsirakenteisten talojen hiilijalanjäljet suuremmiksi kuin puurakenteisen tyyppitalon hiilijalanjälki myös silloin, kun seinärakenteisiin sitoutunut hiilidioksidi on otettu huomioon. Puurakenteisen omakotitalon hiilijalanjälki on 4 % pienempi kuin 270 mm:n paksuisesta hirrestä rakennetun omakotitalon ja 13 % pienempi kuin 180 mm hirrestä rakennetun omakotitalon. Huomattavasti suurin, viidenneksen paksumpi-seinäistä hirsitaloa suurempi, hiilijalanjälki oli kivitalolla. Energiankulutukseltaan kivitalo on samaa luokkaa puutalon kanssa, ja ero hiilijalanjälkeen syntyykin jo rakennusvaiheessa materiaalivalinnassa.

Laskuissa on huomioitu vain seinärakenteisiin sitoutunut hiilidioksidi, joten todellisuudessa sitoutuneen hiilidioksidin määrä on jonkin verran isompi, sillä sitä on sitoutuneena myös muun muassa yläpohjaan. Tämä ei kuitenkaan vaikuttaisi hiilijalanjälkien suuruusjärjestykseen kaikilla tyyppitaloilla ollessa samat katto- ja perustusrakenteet. Ruuskan (2013, 18) tämän työn kaltaisessa vastaavassa laskelmassa hirsitalojen materiaalit ovat poikenneet perinteisen puutalon materiaaleista myös muilta osin kuin ulkoseiniltä, ja hirsitalojen kaikki valinnat on pyritty tekemään mahdollisimman ekologisiksi. Yläpohjassa on puutalossa käytetty mineraalivillaa ja hirsitaloissa ekovillaa, ja puutalon kipsilevyt on hirsitaloissa korvattu puupaneloinnilla. Myös väliseinät on rakennettu paksummasta hirrestä kuin tässä työssä ja alapohja on tehty tuulettuvaksi, mitkä vaikuttavat lopputulokseen. Silti kyseisessä työssä on saatu tulokseksi, että puutalo sitoo hiiltä 76 % vähemmän kuin hirsitalo, ja tässä työssä tulokseksi on saatu puutalon sitovan hiiltä 81 % hirsitaloa vähemmän. Prosenttiero aiheuttanee se, että tässä työssä on käytetty eri lähdettä puutalon seinien sisältämän hiilidioksidin arvioimiseksi.

4.3 Rakenteisiin sitoutuneen energian hyötykäyttö

Aiemmassa taulukossa 14 ei ollut huomioitu rakenteiden energiahyötykäytön vaikutusta hiilijalanjälkeen. Tämän työn tyyppitalojen ollessa seinärakenteita lukuun ottamatta identtiset, on seuraavaksi tarkasteltu vain seiniin varastoitunutta energiaa. Seuraavan 50 vuoden aikainen kerroin sähkölle, jolla voidaan muuttaa siitä aiheutuneet päästöt CO₂-ekvivalenteiksi, on aiemminkin käytetty 92 kg CO₂-ekv/MWh (Ruuska 2013, 38). Jos tyyppitalojen seinärakenteet poltetaan ja lämpö käytetään sähkön tuottamiseen, voidaan laskea, kuinka suurelta päästömäärältä on välttytty. Alla olevassa taulukossa 15 on esitetty

eri seinärakenteiden hyötykäytettävät energiamäärät vältettyinä hiilidioksidiekvivalenttipäästöinä sillä oletuksella, että bioenergian käyttö on nollapäästöistä. Todellisuudessa bioenergian käyttämisestä biokattilassa syntyy päästöjä 6,5 kg CO₂-ekv./MWh (Behm ja Häkkinen 2010, 12). Viimeisessä sarakkeessa on esitetty vältetyt päästöt, kun tämä on otettu huomioon.

Taulukko 15: Eri seinärakenteiden sisältämät, hyötykäytettävissä olevat energiamäärät.

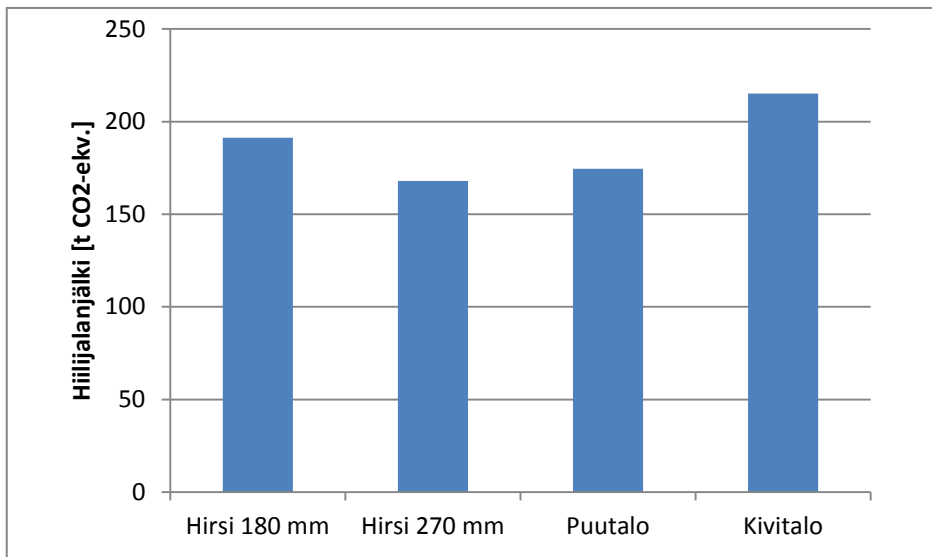
Seinätyyppi	Energiasisältö [MWh/rakennus]	Vältetyt päästöt nollapäästöillä [kg CO ₂ -ekv]	Vältetyt päästöt bioenergian päästökertoimella [kg CO ₂ -ekv]
Hirsiseinä 180 mm	73,9	6799	6318
Hirsiseinä 270 mm	100,9	9282	8627
Puuseinä	20,8	1914	1778
Kiviseinä	7,8	718	717

Myös hirsien valmistamisessa on syntynyt sivutuotteita, jotka yleensä poltetaan energian saamiseksi. Yhden hirsitonnin tuottamisesta saatavien sivutuotteiden energiasisältö on noin 7,6 GJ eli 2,1 MWh, kun puun tiheyden oletetaan olevan 520 kg/m³. (Ruuska 2013, 48.) Tällöin ohuempiseinäisen hirsitalon sivutuotteista saatu energiamäärä olisi 34,4 MWh ja paksumpiseinäisen 47,0 MWh. Hirsien sivutuotteista saadaan siis melkein puolet talojen sisältämästä energiamäärästä. Laskelmissa on huomioitu vain hirsien tuottamisesta syntyvät sivutuotteet, eikä muiden rakennuksessa käytettävien puuosien. Ruuskan (2013, 48) raportissa puurakenteisen omakotitalon puurakenteiden sivutuotteista saatava energiamäärä on alle neljäsos 270 mm:n paksuisesta hirrestä rakennettuun verrattuna. Tässä työssä tämä vastaisi noin 11 MWh:a. Suhde ei ole aivan täsmällinen tämän työn kannalta, sillä Ruuskan raportissa on huomioitu kaikki puurakenteet, ei ainoastaan seiniä, ja raportissa tyyppitalojen rakenteet poikkesivat toisistaan muutenkin kuin ulkoseinien osalta. Tämän työn tarkkuuden kannalta se on kuitenkin riittävä. Taulukossa 16 on esitetty hirsiseinien valmistuksen sivutuotteista saatu energia ja sillä vältetyt päästöt. Bioenergian polttamisesta aiheutuvien hiilidioksidipäästöjen kertoimena on käytetty samaa 6,5 kg CO₂-ekvivalenttia/MWh, kuin aiemminkin.

Taulukko 16: Hirsiseinien sivutuotteista saatava energia.

Seinätyyppi	Sivutuotteiden energiasisältö [MWh/rakennus]	Vältetyt päästöt nollapäästöillä [kg CO ₂ -ekv]	Vältetyt päästöt bioenergian päästökerroimella [kg CO ₂ -ekv]
Hirsiseinä 180 mm	34,4	3165	2941
Hirsiseinä 270 mm	47	4324	4019
Puutalo	11	1012	940

Kun sekä rakenteisiin sitoutunut että sivutuotteista saatava bioenergia otetaan huomioon, saadaan paksumpiseinäisen hirsiseinän hiilijalanjäljeksi 167,9 t CO₂-ekvivalenttia. Tämä on vähemmän kuin samat asiat huomioiden laskettu puurakenteisen tyyppitalon hiilijalanjälki, joka on 173,6 tonnia CO₂-ekvivalenttia. Ohuempiseinäisen hirsitalon hiilijalanjälki pysyy edelleen puurakenteisen talon hiilijalanjälkeä jonkin verran, noin 17 t CO₂-ekvivalenttia suurempana. Alla olevassa kuvaajassa 1 on esitetty eri tyyppitalojen hiilijalanjäljet, kun kaikki tässä työssä lasketut seikat on huomioitu.

**Kuvaaja 1:** Eri tyyppitalojen kokonaishiilijäljet.

4.4 Hirren paksuuden vaikutus ja U-arvon parantaminen

Kuten aiemmin on tullut ilmi, on hirren paksuudella vaikutusta hirsirakennuksen hiilijalanjälkeen. Rakentamisesta aiheutuvia päästöjä 270 mm:n hirrestä rakennetulla talolla tulee vain 433 kg CO₂-ekvivalenttia enemmän kuin 90 mm ohuemmasta hirrestä rakennetulla. Seinärakenteisiin sitoutunutta hiiltä paksumpihirsisessä talossa on 8,6 tonnia CO₂-ekvivalenttia enemmän kuin ohuempihirsisessä talossa. Rakentamisesta aiheutuneet suuremmat hiilidioksidipäästöt kumoutuvat siis helposti sitoutuneen hiilidioksidin määrällä.

Suurin vaikutus hirsitalon hiilijalanjälkeen on rakennuksen lämmitykseen kuluvalle energialla. Heikomman U-arvon omaavan ohuempihirsisen talon lämmittämiseen kuluu vuodessa 3467 kWh enemmän energiaa kuin paksumpihirsisen talon. Tarkasteltavan eliniän eli 50 vuoden aikana se tekee 43 hiilidioksidiekvivalenttitonnia enemmän kuin paksumpihirsisellä talolla. Hirren paksuus vaikuttaa myös taloon sitoutuneeseen energiaan sekä sivutuotteista saatavaan energiaan. Paksumpihirsisen talon seinärakenteisiin sisältyneellä hyödynnettävissä olevalla ja sivutuotteista saadulla energialla voidaan välttää hiilidioksidipäästöjä 7,3 tonnia enemmän kuin ohuempihirsiseen taloon sisältyneellä energialla.

Voidaan siis katsoa, että paksumpi hirsi on hiilijalanjäljeltään ympäristöystävällisempi ja vaikka sen alkukustannukset ovat jonkin verran suuremmat, tulee sen eliniän aikana säästöä ohuempihirsiseen taloon verrattuna halvempien energiakustannusten ansiosta. Tämänhetkisellä yleissähköhinnalla, joka on Lappeenrannassa 6,9 snt/kWh (Lappeenrannan energia 2013), tulee säästöä 50 vuoden aikana 11 200 euroa.

Hirsitalon lämmityksestä aiheutuvaa hiilijalanjälkeä voisi pienentää entisestään, mikäli sen rakentamisessa käytettäisiin lisäeristystä. Eristeenä käytetään usein puukuitueristettä, ja hirsiseinää vasten asennettuihin runkotolppiin kiinnitetään useimmiten hirsipaneeli. Vaihtoehtoisesti voidaan käyttää rakennuslevyä, joka voidaan pinnoittaa tai maalata. Toimivan lisäeristykseen saamiseksi tulee eristyksen olla hyvin ilmatiivis, mitä voidaan edesauttaa esimerkiksi rakennuspahvia käyttämällä. Lisäeristämässä tulee kuitenkin ottaa huomioon, että se saattaa vaikuttaa rakenteen kokonaistoimivuuteen ja hengittävyyteen, jota on pidetty hirsitalon asumismukavuuden perusteena. (Mörönen 2009.)

Toinen vaihtoehto paremman U-arvon saavuttamiseksi on lämpöhirsi, joka näyttää ulkoapäin katsottuna perinteiseltä hirsiseinältä. Sen ulkoseinä on tehty hirsipaneelistä, jonka alla on tuuletusrako ja tuulensuojalevy. Eristyksen jälkeen on höyryn- tai ilmansulku ja sisäpinnan verhoiluna käytetään hirsipaneelia tai kipsilevyä. Tälläkin ratkaisulla rakenteen toimivuus, kuten hengittävyys kärsii. (Mörönen 2009.)

5 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tässä työssä on esitetty vain hyvin karkeat arviot eri talotyyppeiden hiilijalanjäljille. Niiden voidaan kuitenkin ajatella olevan suuruusluokaltaan oikeita ja työstä käy ilmi, kuinka ne poikkeavat suuruudeltaan toisistaan. Eniten vaikutusta hiilijalanjälkien arvojen epätarkkuuksiin ovat aiheuttaneet työn rajaukset. Työstä on rajattu pois muun muassa johtumislämpöhäviöiden kylmäsillat. Myös ILMARI-työkalan oletukset vaikuttavat tämän työn lopputuloksiin, sillä myös siinä on joissain tapauksissa jouduttu käyttämään karkeahkoja arvioita. Tuloksiin on vaikuttanut sekin, että tässä työssä tyyppitalojen rakenteiden on oletettu poikkeavan toisistaan ainoastaan ulko- ja väliseinien osalta. Lisäksi esimerkiksi se, että todellisuudessa paksummalle hirrelle tulisi rakentaa kestävämpi runko, on jätetty huomioimatta. Samantapaisia rakennusteknisiä kysymyksiä on mahdollisesti sivuutettu useampiakin.

Tässä työssä kaikkien tyyppitalojen elinikänä käytettiin 50 vuotta, sillä se on yleisesti käytetty käyttöikä muissa vastaavissa tutkimuksissa. Todellisuudessa etenkin hirsitalojen käyttöikä voi olla huomattavasti pidempi, jopa satoja vuosia. Työn laskelmissa ei ole huomioitu hirsitalon mahdollisesti muita tyyppitaloja pidempää käyttöikää, mikä pienentäisi sen hiilijalanjälkeä. Käytönaikaisen energiankulutuksen yhteydessä olisi voinut olla hyödyllistä selvittää eri sähköntuotannon ja lämmitysmuotojen mahdollisuuksia, joilla olisi saatu erilaisia tuloksia hiilijalanjälkien vertailua varten. Eri sähköntuotannon tai lämmityksen muodot eivät kuitenkaan olisi vaikuttaneet hiilijalanjälkien keskinäisiin tuloksiin, joten niitä ei pidetty olennaisena asiana tässä työssä.

Taustatietoa etsiessä ilmeni, ettei taloa suunnitteleville ole olemassa kovin hyvää laskuria, jolla voisi arvioida eri rakenteiden vaikutusta hiilijalanjälkeen. Tässä työssä käytetty ILMARI-laskuri ei ole saatavilla yksityiseen käyttöön, ja ilmaisena ladattavissa oleva SYNERGIA-laskuri ei sisällä kovinkaan kattavasti tietoa eri materiaaleista. Hirsikodin internetsivuilla on saatavilla Ekolaskuri, jolla voi arvioida hieman oman talonsa ympäristövaikutuksia ja ekologisuutta. Laskurin vertailutalona käytetään maanvaraista mineraalivillalla eristettyä puutaloa, joka on samankokoinen ja -muotoinen kuin käyttäjän ilmoittama oma talonsa. Tuloksissa ei ole esitetty mitään numeroarvoja, vaan eri rakennusmateriaaleja on vertailtu keskenään harmailla palkeilla. Laskuria ei ole tarkoitettu hiilijalanjäljen lasken-

taan, ainoastaan antamaan osviittaa valintoja koskien. (Hirsikoti.) On mahdollista, että joitain kuluttajia kiinnostaisi selvittää tarkemmin eri talovaihtoehtojen hiilijalanjälkiä. Jopa maksulliselle, mutta silti melko helppokäyttöiselle laskurille voisi olla joitain käyttäjiä. Kovin suurta markkinarakoa tuskin on olemassa, sillä Ekolaskuria on käytetty tähän mennessä vain 9800 kertaa (Hirsikoti).

6 YHTEENVETO

Rakennuksen hiilijalanjäljen arvioimiseksi on kehitetty standardeja ja laskentaohjeita vasta viime vuosina. Suomalainen yhdistys Green Building Council Finland on kehittänyt vuonna 2013 rakennusten elinkaarimittariston, jonka yhtenä osa-alueena ovat ilmastovaikutukset. Ohjeistuksen hiilijalanjäljen laskenta perustuu SFS EN 15804:2012 -standardiin. Tässä työssä selvitettiin tähän mittaristoon pohjautuen hiilijalanjälki kahdelle hirsirakenteiselle omakotitalolle, joiden ulkoseinien paksuudet poikkesivat toisistaan. Vertailun vuoksi laskettiin hiilijalanjäljet myös kivi- ja puurakenteisille omakotitaloille. Tarkkojen suunnittelu- ja laskentatietojen puuttuessa on hiilijalanjälkien laskentaa yksinkertaistettu. Laskennassa on käytetty oletusarvoja tapauksissa, joihin ei ole ollut saatavissa soveltuvia suunnitteluarvoja tai todellisia arvoja kohtalaisen helposti. Lisäksi tyyppitalomalli on yksinkertainen ja tyyppitalot eroavat toisistaan ainoastaan seinärakenteiltaan, vaikka todellisuudessa niissä olisi muitakin poikkeavuuksia.

Rakentamisvaiheesta aiheutuvien kasvihuonekaasupäästöjen laskemiseen käytettiin VTT:n kehittämää ILMARI-laskentaohjelmaa. Saaduista tuloksista selvisi, että rakentamisvaiheessa selvästi suurimmat kasvihuonekaasupäästöt aiheutti kivitalo, jonka päästöt olivat yli kaksi kertaa hirsitalojen vastaavia päästöjä suuremmat. Hirsitalojen rakentamisvaiheen päästöt eivät juuri poikenneet toisistaan, sillä niillä oli eroa vain noin 500 kg CO₂-ekvivalenttia. Puutalon rakentamisvaiheen päästöt olivat noin 4 tonnia CO₂-ekvivalenttia hirsitalon päästöjä suuremmat.

Suurin vaikutus rakennuksen hiilijalanjälkeen on käytönaikaisella energiankulutuksella, johon eroja aiheuttavat eri seinärakenteiden toisistaan poikkeavat U-arvot. Kivi- ja puutalon U-arvot olivat lähes samat, joten niiden käytönaikainen energiankulutus ja sitä kautta siitä aiheutuvat kasvihuonekaasupäästöt eivät poikenneet toisistaan paljoakaan. Sen sijaan paksumpiseinäisen hirsitalon käytönaikaisen energiankulutuksen CO₂-ekvivalenttipäästöt olivat 18 % puutalon päästöjä suuremmat ja ohuempiseinäisen hirsitalon päästöt 31 % suuremmat.

Käytönaikaisen energiankulutuksen päästöjä kuitenkin voidaan kompensoida hirsitalojen rakenteisiin sitoutuneella hiilidioksidilla sekä hirsien valmistuksessa syntyvien sivutuotteiden ja rakenteiden sisältämällä bioenergialla, jolla voidaan tuottaa lähes päästöttömäksi

katsottavaa lämmitysenergiaa. Vaikka nämä asiat otetaan huomioon, on ohuempiseinäisen hirsitalon hiilijalanjälki edelleen puurakenteista omakotitaloa noin 10 % suurempi. Paksumpiseinäisen hirsitalon hiilijalanjälki on kuitenkin 4 % pienempi kuin puurakenteisen omakotitalon.

Tuloksista on nähtävissä, että hirsitalorakentamisessa tulisi suosia paksuja hirsiseiniä, jolloin käytönaikaiset energiankulutuksen aiheuttamat päästöt eivät kasvaisi niin suuriksi. Hirsitalon energiankulutusta on mahdollista pienentää myös sen eristävyttä parantamalla, mikä voidaan toteuttaa lisäeristyksellä tai lämpöhirrellä. Lisäeristystä suunnitellessa tulee huomioida, että se vaikuttaa talon hengittävyteen, mitä on pidetty hirsitalon erinomaisena asumismukavuuteen vaikuttavana ominaisuutena.

LÄHTEET

- Alasaarela Matti. 2008a. Hirsiseinän ympäristövaikutusten laskenta elinkaaritarkastelun avulla. [verkkodokumentti]. [viitattu 9.11.2014]. Saatavissa: http://hirsikoti.fi/content_images/tutkimukset_raportit_analyysit/hirsiseinan_elinkaarianalyysi.pdf
- Alasaarela Matti. 2008b. Hirsiseinään varastoituvan hiilen laskenta. [verkkodokumentti]. [viitattu 9.11.2014]. Saatavissa: http://www.hirsikoti.fi/content_images/tutkimukset_raportit_analyysit/hirsiseinan_hiilinielu.pdf
- Behm Katri & Häkkinen Tarja. 2010. Hirsitalotoimialan ekokilpailukyky tarkastelu - hirsitalomallin puumateriaalien elinkaariarviointi käsittäen hiilijalanjäljen, energiataseen ja päästöt. VTT [verkkodokumentti]. [viitattu 4.5.2014]. Saatavissa: http://www.kontio.fi/files/hirsitalotoimiala_raportti_2010.pdf
- Energiatehokkaat ulko-ovet – ekologista eleganssia. [Jeld Wenin www-sivuilla]. [viitattu 20.11.2014]. Saatavissa: http://www.jeld-wen.fi/ideat/ulko_ovi_ideat/artikkelit_ulko_ovet/energiatehokkaat_ulko_ovet/
- Green Building Council Finland. 2013. Rakennusten elinkaarimittarit. [verkkodokumentti]. [viitattu 2.8.2014]. Saatavissa: http://figbc.fi/wp-content/uploads/2013/01/Rakennusten_elinkaarimittarit_2013.pdf
- Gyproc. 2008. Pienrakentajan käsikirja. [verkkodokumentti]. [viitattu 8.11.2014]. Saatavissa: http://www.gyproc.fi/Download/21864/Gyproc_Pienrakentajan_K%c3%a4sikirja.pdf
- Häkkinen Tarja, Vares Sirje, Vesikari Erkki & Karhu Vesa. 2011. Rakennusten elinkaari-tekniikka – Tuoteinformaatio käyttöikäsuunnittelun tueksi. VTT [verkkodokumentti]. [viitattu 5.11.2014]. Saatavissa: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/julkaisut/2001/J848.pdf>
- IPCC. 2006. Direct Global Warming Potentials. [IPCC:n www-sivuilta]. [viitattu 17.1.2014]. Saatavissa: http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/ch2s2-10-2.html

ISO. 2013. ISO / TS 14067:2013. [ISO:n www-sivuilla]. [viitattu 1.8.2014]. Saatavissa: http://www.iso.org/iso/catalogue_detail?csnumber=59521

Isover. Lämpimän tilan yläpohja. [verkkodokumentti]. [viitattu 15.11.2014]. Saatavissa: <http://www.isover.fi/Download/27501/MEYP%201102.pdf>

Kestävä Kivitalo. 2013. Kestävän mitoituksen käyrästä – muuratut julkisivut. [Kestävän Kivitalon www-sivuilta]. [viitattu 15.11.2014]. Saatavissa: <http://www.kivitalo.fi/runkosuunnittelu/alustavan-mitoituksen-kaeyraestoet/12-muuratut-rakenteet/muuratut-julkisivut.html>

Lappeenrannan Energia Oy. 2013. Sähkön myyntihinnasto. [verkkodokumentti]. [viitattu 23.11.2014]. Saatavissa: http://www.lappeenrannanenergia.fi/palvelut/LRE%20tiedostot/Hinnastot/LRE_S%C3%A4hk%C3%B6n%20myyntihinnasto_2013.pdf

Motiva. 2011. Kotitalouksien sähkönkäyttö 2011. [verkkodokumentti]. [viitattu 15.11.2014]. Saatavissa: http://www.motiva.fi/files/8300/Kotitalouksien_sahkonkaytto_2011_Tutkimusraportti.pdf

Motiva 2013. Motivalta lämmitysvaihtoehtojen vertailuun työkalu. [Motivan www-sivuilta]. Päivitetty 9.10.2013. [viitattu 18.10.2014]. Saatavissa: http://www.energiatehokaskoti.fi/ajankohtaista/uutiset/motiva_motivalta_lammitysvaihtoehtojen_vertailuun_tyokalu.459.news

Motiva. 2014a. CO₂-päästökertoimet. [Motivan www-sivuilla]. Päivitetty: 1.4.2014. [viitattu 15.11.2014]. Saatavissa: http://www.motiva.fi/taustatietoa/energian kaytto_suomessa/co2-laskentaohje_energiankulutuksen_hiilidioksidipaastojen_laskentaan/co2-paastokertoimet

Motiva. 2014b. Energiakoulu omakotitalon rakentajalle 1. [Rakentaja.fi:n www-sivuilla]. [viitattu 19.1.2015]. Saatavissa: <http://www.rakentaja.fi/indexfr.aspx?s=/kuluttaja/motiva/energiakoulu1.htm>

Mörönen Arto. 2009. Hirsitalo omakotitalona. [www-sivusto]. [viitattu 22.11.2014]. Saatavissa: <http://www.rakennaoikein.fi/fi/artikkelit/hirsitalo-omakotitalona?page=0%2C7>

Paroc. 2013. Pientalon terve ja turvallinen eristäminen. [verkkodokumentti]. [viitattu 16.11.2014]. Saatavissa: <http://www.taloon.info/pdf/ParocEristaminen.pdf>

Paroc. 2014. Tuulettuvat ulkoseinät: puurunkoseinät. [Parocin www-sivuilta]. [viitattu 13.11.2014]. Saatavissa: <http://www.paroc.fi/ratkaisut-tuotteet/ratkaisut/ulko-javaliseinat/tuulettuvat-ulkoseinat-puurunkoseinat>

Pasanen Panu. 2013. Kestävän rakentamisen elinkaarimalli – esimerkki standardien soveltamisesta. Bionova Consulting [verkkodokumentti]. [viitattu 2.8.2014]. Saatavissa: http://freshproject.eu/data/user/01_public-area/FRESH_Intra_regional_meeting_25.1.2013__PP2_PP3__PP1/Bionova_FRESH_elinkaaari_standardit_25tammi2013.pdf

Puuinfo. 2010. Rakennusmateriaalien hiilijalanjälki. [verkkodokumentti]. [viitattu 29.4.2014]. Saatavissa: <http://www.puuinfo.fi/sites/default/files/content/info/rakennusmateriaalien-hiilijalanjalki/rakennusmateriaalien-hiilijalanjalki-web.pdf>

Rantajärvi Leena. 2014. Rakennusmateriaaleilla on väliä. [Suomen ympäristökeskuksen www-sivuilta]. Päivitetty 6.2.2014. [viitattu 5.5.2014]. Saatavissa: http://www.syke.fi/fi-FI/Julkaisut/Ymparistolehti/2013/Rakennusmateriaaleilla_on_valia%2828190%29

RT 18-10922. 2008. Kiinteistön tekniset käyttöiät ja kunnossapitojaksot. Rakennustietosäätiö RTS. LVI 01-10424, KH 90-00403.

Rakennusteollisuus RTT ry, Betoniteollisuus ry, Betonilattiyhdistys ry. 2012. Betonilattiat kortisto. Suomen Rakennusmedia Oy. 68. ISBN 978-952-296-062-3.

Ruuska Antti. 2013. Life-cycle environmental impacts of a standard house and three log house cases. VTT [verkkodokumentti]. [viitattu 1.11.2014]. Saatavissa: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/technology/2013/T148.pdf>

SFS-EN 15804:2012 + A1. 2013. Sustainability of construction works - Environmental product declarations - Core rules for the product category of construction products. EUROPEAN STANDARD NORME EUROPÉENNE, EUROPÄISCHE NORM. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS. 65.

Sitra. 2014. Energiankulutus, päästöt ja ilmastonmuutos. [Sitran www-sivuilta.] [viitattu 30.12.2014]. Saatavissa: <http://www.sitra.fi/ekologia/ilmastonmuutos>

Suomen Rakentamismääräyskokoelma C3 = 2002/91/EY. 2008. Rakennusten lämmöneristys. EYVL N:o L1, 4.1.2003.

Suomen Rakentamismääräyskokoelma D3 = 2010/31/EU. 2011. Rakennusten energiatehokkuus. EUVL N:o L 153, 18.6.2010.

Suomen Rakentamismääräyskokoelma D5 = 2002/91/EY. 2007. Rakennuksen energiankulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskenta. EYVL N:o L 1, 4.1.2003.

Suomen Rakentamismääräyskokoelma G1. 2004. Asuntosuunnittelu.

Suomi rakentaa. 2013a. Korjaa julkisivu entistä kunnioittaen. [Suomi rakentaa www-sivuilta]. Päivitetty 19.1.2013. [viitattu 5.11.2014]. Saatavissa: <http://www.suomirakentaa.fi/korjaaja/ulkoseinaet-ja-julkisivut/julkisivukorjaus>

Suomi rakentaa. 2013b. Monta tapaa tehdä väliseinät. [Suomi rakentaa www-sivuilta]. Päivitetty 19.1.2013. [viitattu 9.11.2014]. Saatavissa: <http://www.suomirakentaa.fi/korjaaja/sisaeseinae-ja-kattoverhous/vaeliseinaet>

Tiivi. Tekniset tiedot. [Tiivin www-sivuilta]. [viitattu 19.11.2014]. Saatavissa: <http://www.tiivi.fi/ikkunat/tiivi-ikkunat/tekniset+tiedot>

Vallox. 2010. Vallox osaa matalaenergiailmanvaihdon. [verkkodokumentti]. [viitattu 19.11.2014]. Saatavissa: <http://www.keravanomakoti.net/eilta/Allonen07102010.pdf>

Werro Wool. Ominaisuudet ja edut. [Werro Woolin www-sivuilta]. [viitattu 19.11.2014]. Saatavissa: <http://werrowool.eu/selluloosa-1/ominaisuudet-ja-edut>

Ympäristöministeriö. 2013. Energiatodistuksen laadintaesimerkki – Uudiskerrostalo. [verkkodokumentti]. [viitattu 17.11.2014]. Saatavissa: https://www.facebook.com/ajax/messaging/attachment.php?attach_id=41c0ecb0d76b811d15770dac7a81f979&mid=mid.1416131887785%3Afc7cdf2b91ab3af247&hash=AQCGal-5MAD2oJ5U