

Passiivitason asuinkerrostalon elinkaaren hiilijalanjälki

Tapaustutkimus kerrostalon ilmastovaikutuksista

Panu Pasanen, Juho Korteniemi ja Anastasia Sipari
Bionova Consulting

Sisällys

Esipuhe	4
Tiivistelmä	5
Summary.....	6
1. Johdanto	7
2. Selvityksen tavoitteet.....	8
3. Tarkastelun kohde ja rajaukset	9
Asuinrakennuksen toiminnallinen yksikkö	9
Tarkastelujärjestelmän rajaukset.....	10
Elinkaari ja tarkastelujakso.....	10
Tarkastelujärjestelmän rajaukset.....	10
Laskennassa käytetyt oletukset	11
4. Inventaarioanalyysi	12
Rakennuksen materiaalitase.....	12
Tietojen keruu, laadun varmistaminen ja allokatio.....	12
Rakennuksen massat.....	12
Rakennuksen materiaalitase.....	13
Rakennustyömaan energiapanokset.....	15
Käytön aikaiset päästöt.....	15
Käytön aikainen ostoenergian kulutus	15
Rakennuksen korjaukset ja talotekniikan päivitykset	16
Rakennuksen pintojen ylläpito.....	16
Rakennuksen purkaminen ja materiaalien kierrätys.....	17
5. Käyttöön ja energiaratkaisujen merkitys	18
Energiantuotannon päästöjen kehitys	18
Rakennuksen lämmitysmuodon merkitys.....	19
Elinkaaren pituuden vaikutus laskentaoletuksiin.....	19
6. Tulokset: asuinkerrostalon hiilijalanjälki	20
Tulosten esittämistapa.....	20
Rakennuksen elinkaaren päästöjen jakauma	20
Energiatehokkuuden vaikutus tuloksiin	21
Elinkaaren pituus ja energian päästökerroin	22
Lämmitysratkaisun vaikutus elinkaaren päästöihin	24
Osarakenteiden vaikutus päästöihin.....	25
Rakenteiden hiilivarasto.....	26

7. Johtopäätökset	28
Johtopäätökset rakennuksen elinkaaren hiilijalanjäljestä	28
Laskentamenetelmiin ja oletuksiin liittyvät huomiot.....	29
Tulosten yleistäminen ja epävarmuustekijät	31
Johtopäätöksiä rakennusosalalle.....	31
Muita näkökulmia	32

Lähdeluettelo	34
----------------------------	-----------

Liite: Käytetyt päästökertoimet.....	35
---	-----------

Esipuhe

Rakennusten energiankulutuksen, rakennusmateriaalien valmistuksen ja rakentamiseen kuluvan energian osuus primäärienergian käytöstä on noin 45 prosenttia ja kasvihuonekaasupäästöistä lähes 40 prosenttia. Sitran Energia-ohjelma etsii mahdollisuuksia ja kannustaa energiankäytön ja päästöjen vähentämiseen.

Energiatohokkuuden parantaminen on aika ajoin nostanut kysymyksen rakentamis- ja käyttövaiheiden merkityksestä rakennusten aiheuttamissa päästöissä. Viime aikoina tämä keskustelu on usein pelkistynyt kysymyksiin siitä, miten paljon rakentamisvaiheen merkitys on lisääntynyt energiatohokkuuden parantamisen edistysaskelista johtuen ja mitkä ovat puu- ja betonirakentamisen väliset erot. Näihin kysymyksiin voidaan etsiä objektiivisia vastauksia mahdollisimman kokonaisvaltaisella tarkastelulla, jossa kaikki rakennuksen elinkaaren olennaiset vaiheet otetaan huomioon.

Rakennusliike Reponen Oy:n toteuttama puukerrostalo Heinolassa tarjosi mahdollisuuden tarkastella puurunkoisen asuinkerrostalon hiilijalanjälkeä kohteessa toteutuneiden todellisten materiaalmäärien perusteella ja verrata sitä yleisesti tunnettuun vastaavaan laskennalliseen betonirakenteiseen kerrostaloon. Bionova Consulting Oy oli aiemmin tehnyt alustavan selvityksen kyseisen rakennuksen hiilijalanjäljestä Rakennusliike Reposen, Versowood Oy:n ja Koskisen Oy:n toimeksiannosta. Tämä tarjosi hyvän pohjan jatkotarkasteluille. Tässä työssä tarkennettiin ja laajennettiin tarkastelua kattamaan kaikki rakentamis- ja käyttövaiheen osa-alueet, eri pituiset elinkaaret sekä ottamaan huomioon energiantuotannon päästöjen kehitys.

Kyseessä on tapaustutkimus, joka ei esitä yleisiä johtopäätöksiä, mutta on tuottanut tutkittua tietoa kyseisestä kerrostalokohteesta. Toivomme, että tutkimuksen tulokset auttavat erottelemaan olennaisia asioita vähä-merkityksellisemmistä sekä löytämään koko rakentamisen ketjusta mahdollisimman kustannustehokkaasti toteutettavia päästövähennyksiä. Tulokset kannustavat kehittämään työkaluja ja tekemään vastaavia tarkasteluja jatkossakin rakennusten energia- ja materiaalitehokkuuden parantamiseksi.

Sitran puolesta kiitämme Rakennusliike Reposen toimitusjohtaja Mika Airaksela hankkeen avaamisesta tarkastelua varten ja selvityksen tekijöitä Panu Pasasta, Juho Korteniemeä ja Anastasia Siparia hyvästä yhteistyöstä.

Helsingissä 5.12.2011

Jukka Noponen
Johtaja
Sitran Energiaohjelma

Jarek Kurnitski
Johtava asiantuntija
Sitran Energiaohjelma

Tiivistelmä

Selvityksessä tutkittiin passiivitasoisen asuinkerrostalon elinkaaren hiilijalanjälkeä. Tutkimuskohde on viisikerroksinen elementeistä rakennettu puukerrostalo, jossa on pilaripalkkirunko ja ohut betonikerros välipohjissa. Rakennuksen on rakentanut Rakennusliike Reponen. Rakennusta verrattiin vastaavaan betonielementtitaloon.

Päästölaskelmaan sisällytettiin kaikki elinkaaren vaiheet: raaka-aineiden hankinta, materiaalien valmistus, rakentaminen, rakennuksen käyttövaiheen energiankulutus, remontointi, korjaus ja pintojen huolto sekä rakennuksen purkaminen ja materiaalien kierrätys. Laskenta kattaa kaikki materiaalit täyttösorasta lattiatasoon saakka, eli kalusteet pois lukien. Mukana tarkastelussa ovat runkorakenteet, ikkunat, ovet, lattiamateriaalit ja talotekniikka. Rakennuksen materiaalitase perustuu rakennuksen suunnittelu-, tilaus ja toimitustietoihin.

Rakennuksen käyttöiäksi on arvioitu 100 vuotta ja energian päästöjen oletetaan pienenevän ajan myötä. Laskennassa on skenaarioita, joissa tarkastellaan energia-
tehokkuuden, aikajänteen (30, 50 ja 100 vuotta) ja lämmitysratkaisun vaikutusta tuloksiin. Tuloksena voidaan todeta, että kaikissa skenaarioissa käyttövaiheen energia on suurin yksittäinen tekijä elinkaaren päästöissä. Sadan vuoden elinkaarella passiivitasoisessa puurakennuksessa päästöjen jakauma on: energia 76 %, materiaalit ja purku 15 %, työmaa ja korjaus 9 %. Betonirakennuksessa jakauma on: energia 71 %, materiaalit ja purku 21 %, työmaa ja korjaus 8 %.

Vuoden 2012 rakennusmääräysten mukaisen rakennuksen (ostoenergiaa 125 kWh / m² / v) ja lähes nollaenergiarakennuksen (80 kWh / m² / v) elinkaaren päästöjen ero vaihtelee välillä 33 – 39 %, aikajänteestä ja materiaalista riippuen. Passiivitaso (100 kWh / m² / v) vähentää elinkaaren päästöjä 16 – 18 % määräystasoon verrattuna. Yksittäisenä ratkaisuna merkittävin on kuitenkin rakennuksen lämmitysmuoto. Jos rakennuksen koko lämmitystarve voidaan kattaa uusiutuvalla energialla, voidaan tällä vähentää elinkaaren hiilidioksidipäästöjä jopa 45 %.

Rakennusvaiheessa syntyneen eron ansiosta puu- ja betonikerrostalon välinen päästöero on elinkaaren pituudesta ja rakennuksen energiatehokkuudesta riippuen 5 – 11 % puurakenteen eduksi. Materiaalien prosentuaalinen päästöero riippuu mm. siitä, tarkastellaanko koko rakennusta ja rakennuksen koko elinkaarta. Jos tarkastellaan pelkkää rakennusvaihetta, ovat päästöt puurakenteella noin 191 kg CO₂ / nm² ja betonirakenteella noin 268 kg CO₂ / nm², eli eroa on 29 %.

Muita elinkaaren päästöjen kannalta merkityksellisiä tekijöitä ovat rakenteiden hiilivarastot, jotka puuhybriditalossa vastaavat 16 % ja betonirakennuksessa 2 % sadan vuoden päästöistä. Hiilivarastot säilyvät, kunnes puurakenteet poltetaan. Työmaan päästöjen ja korjaamisen osuus elinkaaren päästöistä on noin 8 – 9 %.

Laskennassa käytettävät oletukset ja laskennan rajaukset vaikuttavat merkittävästi tuloksiin. Tarkasteltujen laskentaskenaarioiden päästöerot ovat enimmillään 2,5-kertaisia. Tarkastelujen käyttökelpoisuuden kannalta merkitystä on etenkin läpinäkyvyydellä sekä elinkaaren ja rakennuksen kokonaistarkastelulla.

Selvityksen on toteuttanut Sitran toimeksiannosta Bionova Consulting.

Summary

This report concerns a full life cycle carbon footprint study for a passive house type wooden-framed apartment building. The studied building has five floors and is constructed from gluelam elements. The contractor was Rakennusliike Reponen. The building was compared with similar concrete element building.

The study covers all phases of the life cycle: materials extraction, component production, construction, building use phase energy consumption, renovation, repairs and surface maintenance as well as demolition and material disposal. The material inventory covers all materials from foundations to floor surfacing, however interior furnishings, furniture and household equipment are out of scope. The scope covers the frame, windows, doors, floor surface materials and building services. The material inventory is based on data provided by the contractor.

The apartment building is assumed to last for 100 years and energy production emissions are assumed to decrease over time. The study contains scenarios, where energy efficiency, calculation period (30,50 and 100 years) and heat supply source are varied. The key outcome of the study is that in all scenarios the use phase energy consumption is the largest contributor to the carbon emissions. For 100 year use phase in a wood frame apartment building the lifecycle emissions consists of following sources: use phase energy 76 %, materials and recycling 15 %, construction and repairs 9 %. For a concrete element building use phase energy is 71 %, materials & recycling 21 %, construction & repairs 8 % of total.

Energy efficiency has significant potential for reducing emissions. The difference in lifecycle emissions for a building compliant with Finnish 2012 building code (delivered energy 125 kWh / m² / a) and a "near-zero energy" (80 kWh / m² / a) building is 39 % over 100 years. Passive house level (100 kWh / m² / a) achieves 18 % lower emissions than required by 2012 code. However, the single measure with the highest impact at the building level is heat source. If heating can be supplied with renewables, this reduces carbon emissions by up to 45 %.

Due to the construction phase differences the wooden frame building has some 5–11 % lower lifecycle emissions when compared to the concrete element building, depending on calculation period and energy efficiency level. This difference would be percentage-wise higher, if the scope of study is limited and does not cover the entire building or all energy consumption components. If only the construction phase is considered, emissions for the wood frame building are ca. 191 kg CO₂ / m² and for concrete ca. 268 kg CO₂ / m², a 29 % difference.

Carbon stored in the wood materials accounts for 16 % and 2 % of the building lifecycle emissions, in wooden framed and concrete element buildings respectively. The carbon remains stored until the building is demolished and wood burned. Construction work and repair account for 8–9 % of the building lifecycle emissions.

The assumptions and the scope of the study have major impact on the results. The results between studied scenarios differ by a factor of up to 2,5. Therefore documenting assumptions transparently matters for the usability of the results.

The study was completed by Bionova Consulting on an assignment from Sitra.

1. Johdanto

Hiilijalanjälkitutkimuksen kohde on Rakennusliike Reponen Oy:n Heinolaan rakentama puurunkoinen kerrostalo, jonka konseptinimi on PuuEra. PuuEra on energiatehokkuudeltaan passiivitasoinen viisikerroksinen puukerrostalo, jonka runkorakenteena ovat liimapuusta valmistetut puuelementit. Vertailurakennus on Reponen toteuttama vastaava, laskennallinen passiivitason betonikerrostalo. Rakennettavaa puukerrostaloa kutsutaan hybridipuukerrostaloksi. Kerrostalon puuverhotut kantavat ulkoelementit on yhdistetty pilaripalkkirakenteeseen, ja välipohjassa yhdistetään liimapuun ominaisuudet ohueen betonikerrokseen.

Selvityksen tilaaja on Sitra ja toteuttaja on Bionova Consulting. Selvitys perustuu aiempaan Bionova Consultingin toteuttamaan hiilijalanjälkilaskelmaan, jonka tilaajina olivat Rakennusliike Reponen, Versowood Oy ja Koskisen Oy. Tässä raportissa työtä on jatkokehitetty ja tulokset on nyt ensimmäistä kertaa julkaistu. Tekijät kiittävät Sitraa, Rakennusliike Reponen Oy:tä, Versowood Oy:tä ja Koskisen Oy:tä, jotka ovat tehneet tämän selvityksen mahdolliseksi. Kiitämme myös kaikkia tahoja, jotka ovat antaneet tietoja käyttöön tätä hanketta varten.



Kuva 1 PuuEra on Suomen ensimmäinen yli nelikerroksinen puukerrostalo.

2. Selvityksen tavoitteet

Tämän selvityksen tavoite on tuottaa rakennusalalla toimiville ja alaan liittyville tahoille julkista tietoa passiivienergiatasoiseksi toteutetun asuinkerrostalon koko elinkaaren aikaisista ilmastovaikutuksista ja tärkeimmistä tekijöistä, jotka ohjaavat rakennuksen elinkaaren aikaista hiilijalanjälkeä ja kuinka sitä voidaan hallita. Selvitys sisältää rakennusmateriaalien ja lämmitysratkaisujen välisiä vertailuja. Selvityksen tarkoitus ei ole ottaa kantaa näiden keskinäiseen paremmuuteen, vaan tuoda esille niiden merkitys osana rakentamisen kokonaisuutta.

3. Tarkastelun kohde ja rajaukset

Asuinrakennuksen toiminnallinen yksikkö

Valittu toiminnallinen yksikkö, johon päästöt suhteutetaan, on m² lämmitettyä nettoalaa / vuosi (nettom² / vuosi). Rakennusvaiheen päästöt on tietyissä kohdissa esitetty lämmitettyä nettoalaa kohti ilman aikajakajaa. Muita toiminnallisia yksiköitä ei tarkastella. Päästöjen ilmoittamisen yksikkö on kilogrammaa hiilidioksidiekvivalenttia, joka on lyhennetty muotoon kg CO₂.

Lämmitetyn nettoalan määritelmä on rakennusmääräysten D3 2012 mukaan: *"lämmitettyjen kerrostalojen summa kerrostaloja ympäröivien ulkoseinien sisäpintojen mukaan laskettuna. Lämmitetty nettoala voidaan laskea myös lämmitetystä bruttoalasta, josta on vähennetty ulkoseinien rakennusosa-ala".*

Toiminnallinen yksikkö soveltuu hyvin selvityksen tavoitteisiin ja mahdollistaa lisäksi erikokoisten ja -muotoisten rakennusten keskinäisen vertailun. Rakennuksia vertailtaessa on myös tarpeen varmistaa tekninen ja toiminnallinen vastaavuus.

Toiminnallisen yksikön heikkous on se, että suuremman pinta-alan asunnot, joissa asuu sama määrä ihmisiä, voivat näyttää tehokkaammilta, jos niissä tietyt kiinteät tai lähes kiinteät päästöt voidaan jakaa suuremmalle asumispinta-alalle. Tällä ei ole kuitenkaan merkitystä tämän tarkastelun kannalta.

PuuEra-kerrostalon tärkeimmät tunnusluvut näkyvät taulukosta 1.

Rakennuksen tunnusluvut	Arvo	Yksikkö
Asuntoja	27	kpl
Huoneistoala	1 462,5	hm ²
Rakennusoikeudellinen kerrosala	2 065	brm ²
Lämmitetty nettoala (250 mm seinäpaksuudella)	2 065	nettom ²
Rakennuksen tilavuus	7 687	rm ³

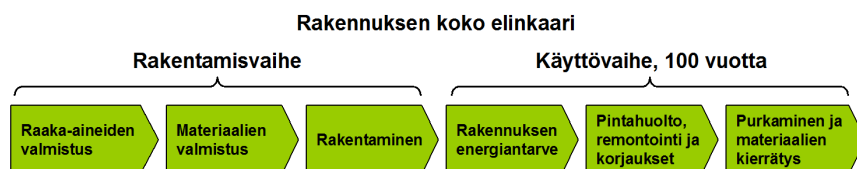
Taulukko 1 PuuEra-kerrostalon tärkeimmät tunnusluvut.

Kiinteistöön kuuluu 113 m² ulkorakennus, joka sisältää väestönsuojan ja toimii muuten tavaravarastona. Ulkorakennus pidetään noin 15 °C lämpötilassa. Lisäksi kiinteistöön kuuluu myös jätekatos. Autokatosta tai -talleja ei ole.

Tarkastelujärjestelmän rajaukset

Elinkaari ja tarkastelujakso

Hiilijalanjälki huomioi rakennuksen elinkaaren vaiheet kehdestä hautaan: raaka-aineiden hankinta, materiaalien valmistus, rakentaminen, rakennuksen käyttö ja rakennuksen purku. Myös eri vaiheiden väliset kuljetukset on huomioitu.



Kuva 2 Rakennuksen elinkaaren vaiheet.

Kaikissa elinkaaren vaiheissa kuluu energiaa ja syntyy jätteitä. Rakennuksen elinkaaren vaiheista ainoa päästöjä vähentävä vaihe on materiaalien kierrätys rakennuksen elinkaaren päätteeksi, kun puurakenteista tuotetaan energiaa ja metallit ja muut raaka-aineet hyödynnetään korvaamaan uusioraaka-aineita. Rakennuksen käyttöaikana tai purkamisen jälkeen tapahtuvaa betonin karbonatisaatiota ei ole huomioitu päästölaskennassa.

Teknisesti rakennuksen oletetaan kestävän käyttöä 100 vuotta, jonka jälkeen se puretaan. Elinkaariarviointi tehtiin kolmella eri pituisella käyttövaiheella, jotka ovat 30, 50 ja 100 vuotta. Syy eripituisiin tarkastelujaksoihin johtuu vaihtelevista käytännöistä, ja näin esitettyä tulos osoittaa tarkastelujakson merkityksen tulokseen. Kahteen ensimmäiseen arviointiin ei huomioida rakennuksen purkua, sillä rakennus todennäköisesti puretaan vasta 100 vuoden kuluttua. Sadan vuoden elinkaari perustuu rakentajan arvioon rakennuksen teknisestä kestävyyydestä.

Tarkastelujärjestelmän rajaukset

Asumisen päästöihin luetaan tässä sekä kiinteistöistä että kiinteistön toiminnoista, asuntojen ja veden lämmityksestä ja asumisesta aiheutuva energiankulutus sekä kiinteistön rakenteiden huolto ja ylläpito. Asumisen aikaista vesi- tai jätehuoltoa ei ole huomioitu. Rakentamisen aikainen jätehuolto on huomioitu niiden toimittajien ja vaiheiden osalta, joilta jätehuollon tiedot ovat olleet saatavilla.

Tarkastelussa on huomioitu kaikki rakennuksen merkittävät materiaali-erät lattiatasoon saakka, eli kalusteet pois lukien. Mukana tarkastelussa ovat perustus, runkorakenteet, seinät ja väliseinät, ylä-, ala- ja välipohjat, ikkunat ja ovet, lattiamateriaalit, katto sekä suurimmat talotekniikan laitteet eli hissi, ilmanvaihtokoneet ja sprinklerijärjestelmä. Materiaalitiedot on koottu rakennuksen suunnittelu-, tilaus- ja toimitustiedoista sekä rakennuksen päätoimittajilta.

Tarkastelun ulkopuolelle on jätetty asuntojen kalusteet ja keittiövarustus, sisustusratkaisut sekä vähämerkityksellisenä pidettävä talotekniikka. Näiden painoja ja osuutta rakennuksen päästöistä ei ole erikseen arvioitu. Pihan ja

kunnallistekniikan liityntöjen vaikutuksia ei ole otettu mukaan tarkasteluun. Myöskään asukkaiden muusta toiminnasta aiheutuvia päästöjä ei ole huomioitu.

Laskennassa käytetyt oletukset

Heinolaan rakennettu PuuEra-kerrostalo liitetään uusiutuvalla energialla tuotettuun kaukolämpöön. Tämän energiaratkaisun oletetaan olevan käytössä rakennuksen koko elinkaaren ajan. Toisaalta, jotta hankkeen tulokset olisivat laajemmin hyödynnettävissä myös alueilla, joissa kaukolämpö ei ole uusiutuvaa, laskelmat on tehty erikseen keskimääräisellä kaukolämmöllä ja puulämmöllä.

Koska rakennusta ollaan vasta nyt ottamassa käyttöön, ovat käytön aikaiset kulutukset veden, lämmön ja sähkön osalta oletettavia. Olettamia voidaan kuitenkin pitää perusteltuina, sillä ne perustuvat Rakennusliike Reposen rakentamiin, vastaavissa passiivitasoisissa kerrostaloissa toteutuneisiin arvoihin.



Kuva 3 PuuEra lämpiää läheisen sahan sivutuotteista tehdyllä kaukolämmöllä.

Tiettyjen rakennusmateriaalien osalta on käytetty valmistajien itsensä teettämiä elinkaariarviointien tuloksia. Näitä on pidetty riittävän luotettavina selvityksen tarpeisiin ja näihin liittyviä mahdollisia epävarmuuksia ei ole huomioitu. Osalle materiaaleista on käytetty myös ympäristöselosteiden tietoja. Päästölaskennassa käytetyt kirjallisuuslähteet ja tietokannat on esitetty lähdeluettelossa.

Sähkön ja kaukolämmön tuotantoa käsitteleviä oletuksia on käsitelty tarkemmin kappaleessa *Energiantuotannon päästöjen kehitys*.

4. Inventaarioanalyysi

Rakennuksen materiaalitase

Tietojen keruu, laadun varmistaminen ja allokaatio

PuuEran tuotantoketju on jäljitetty kokonaisuudessaan Rakennusliike Reponen Oy:n, Versowood Oy:n, Koskisen Oy:n ja LS Laatuseinä Oy:n toimitusten osalta. Muutaman muun avaintoimittajan tuotantoketju on jäljitetty osittain. Muiden toimittajien osalta on käytetty toimittajan ilmoittamaa tai kirjallisuustietoa. Betonitalon osalta tiedot perustuvat rakennusliikkeen antamiin tietoihin.

Lähtötietojen laatua on valvottu vertaamalla saatuja tuloksia muihin tuloksiin. Tuotantolaitosten energiankulutukset ja sivuvirrat on allokoitu massapohjaisesti.

Rakennuksen massat

Rakennus ja sen massat on jaettu taulukossa 2 esitettyihin kokonaisuuksiin.

Kokonaisuus	Puukerrostalo tn	Betonikerrostalo tn
Maansiirto ja täyttösora	640	640
Perustus ja hissikuilu	737	737
Rakennuksen runko	561	1 989
Kuluvat materiaalit ja koneet	55	55
Yhteensä tonnia	1 993	3 421

Taulukko 2 Rakennus ja sen massat jaoteltuna kokonaisuuksiin.

Edelliset massat lämmitettyä nettoneliötä kohti on esitetty taulukossa 3.

Kokonaisuus	Puu kg / nettom ²	Betoni kg / nettom ²
Maansiirto ja täyttösora	310	310
Perustus ja hissikuilu	357	357
Rakennuksen runko	272	963
Kuluvat materiaalit ja koneet	27	27
Yhteensä kg / nettom²	965	1 657

Taulukko 3 Rakennuksen massat lämmitettyä nettoneliötä kohti.

Rakennuksen materiaalitase

Rakennuksen lasketun materiaalitaseen jakauma on esitetty taulukossa 4.

Lopulliset massat ovat voineet muuttua lasketuista työmaalla tehtyjen lisätilausten tai ylijääneiden materiaalien vuoksi, joita ei ole hankkeessa seurattu. Näillä ei kuitenkaan ole merkityksellistä vaikutusta tuloksiin. Rakennusmateriaalien päästöjen laskennassa käytetyt lähteet on dokumentoitu lähdeluettelossa.

Passiivitasoisen kerrostalon materiaalitase		Puutalo tn	Betonitalo tn
Maansiirto ja täyttösora Materiaali		Massa tn	Massa tn
Maantäyttösora	Murske	640	640
Maansiirto ja täyttösora yhteensä, tn		640	640
Perustus ja hissikuilu Materiaali		Massa tn	Massa tn
Sokkeli	Betonielementti	168	168
Pohjavalu ja hissikuilu	Betonivalu	254	254
Väestönsuoja	Betonivalu	240	240
Jätekatos (kylmä)	Betonivalu	74	74
Perustus ja hissikuilu yhteensä, tn		737	737
Rakennuksen runko Materiaali		Massa tn	Massa tn
Puuelementit	Sahatavara	4	0
Puuelementit	Liimapuu	122	0
Puuelementit	Puuliima	2	0
Puuelementit	Vaneri	20	0
Puuelementit	Ulkoverhouspaneeli	14	0
Puuelementit	Koolaus	2	0
Puuelementit	Höyrynsulkumuovi	9	0
Lattiatasoitukset	Betonivalu	192	80
Elementit ja ontelolaatat	Betonielementti	0	1 826
Puutalon materiaaleja	Eri materiaaleja	3	0
Elementtien jne. eristys	Lasivilla, kivivilla	12	14
Palonsuojaus jne.	Kipsilevy	169	60
Muu puutavara	Sahatavara	13	9
Rakennuksen runko yhteensä, tn		561	1 989
Kuluvat pinnat ja koneet Materiaali		Massa tn	Massa tn
Pinnoitusmateriaalit	Keramiikkalaatat	10	10
Pinnoitusmateriaalit	Laminaatti, graniitti	10	10
Kattopinnoite	Kattobitumihuopa	10	10
IV-koneet, 30 kpl	Metallirakenteisia	3	3
Hissi, 1 kpl	Metallirakenteinen	3	3
Ikkunat, 176 kpl	Puualumiini, 3-lasia	12	12
Ovet ja luukut, 238 kpl	Eri tyyppisiä	8	8
Kuluvat materiaalit ja koneet yhteensä, tn		55	55
Rakennuksen materiaalit yhteensä, tn		1 993	3 421

Taulukko 4 Rakennuksen massat yksityiskohtaisesti eriteltyinä.

Rakennustyömaan energiapanokset

Työmaan valmistelu, rakennuskoneet, työmaakopit ja materiaalien, henkilöiden sekä jätteiden kuljetukset vaativat energiaa. Tässä on esitetty vain rakennustyömaalla tapahtuva energian kulutus, ja materiaalien valmistuksessa käytetty energia on huomioitu materiaalien päästöissä. Rakennus valmistui lokakuussa 2011, joten energiankulutukset perustuvat arvioihin.

Energiamuoto	Polttoainetta litraa	Energiaa kWh
Diesel, maansiirto	6 700	67 335
Diesel, muu rakennus	5 000	50 250
Sähkö		90 000
Yhteensä kWh		207 585

Taulukko 5 Rakennustyömaan energian kulutus.

Käytön aikaiset päästöt

Käytön aikainen ostoenergian kulutus

Rakennuksen käytön aikainen ostoenergian kulutus on arvioitu Rakennusliike Reposen rakentamien muiden passiivitasoisten asuinkerrostalojen toteutuneiden kulutusten perusteella. Lisäksi laskentaan on otettu mukaan kaksi vertailuvaihtoehtoa, joiden avulla voidaan hahmottaa energiatehokkuuden merkitystä rakennuksen elinkaaren hiilijalanjäljen pienentämisessä. Käytetyt ostoenergian kulutusarvot löytyvät taulukosta 6.

Energiamuoto ja määrä kWh / nettom ² / vuosi	Talo 2012 määräyksillä	Rakennettu passiivitalo	Lähes nolla-energiatalo
Lämmitys (vesi, ilma ja tilat)	80	60	40
Jäähdytys	0	0	0
Sähkö (kiinteistö ja talous)	45	40	40
Ostoenergiaa yhteensä	125	100	80

Taulukko 6 Vertailussa käytetyt ostoenergian kulutusarvot.

Taloussähkön määränä on pidetty kaikissa tapauksissa 25 kWh / nettom² / vuosi. Väestönsuojan arvioidaan kuluttavan yhteensä 35 kWh energiaa nettom² / vuosi.

Rakennuksen korjaukset ja talotekniikan päivitykset

Käytännössä vain rakennuksen perustus ja runko kestävät koko 100 vuoden elinkaaren loppuun saakka ilman merkittävää korjausta normaalioloissa. Eri rakenteet ja osat kuluvat vaihtelevalla nopeudella, ja rakennuksen omistajan päätökset vaikuttavat siihen, milloin rakennuksen osia vaihdetaan tai huolletaan.

Tuntematonta korjaussykliä on yksinkertaistettu olettamalla, että kaikki kuluvat osat vaihdetaan kaksi kertaa 100 vuoden aikana. Korvaavien osien päästötaso on oletettu nykypäivän päästötasoksi ja osien kierrätyksen päästötaso on näin myös huomioitu nykypäivän päästötasoksi. Huomioidut kuluvat osat ovat:

- talotekniikka: hissi ja ilmanvaihtokoneet
- ikkunat ja ovet: ikkunat, parvekeovet, ulko-ovet ja sisäovet
- kattohuopa
- lattiapinnoitteet: keramiikkalaatat, laminaatti ja muovimatto.

Rakennuksen pintojen ylläpito

Puukerrostalossa rakennuksen ulkoseinät maalataan kerran 10 vuodessa. Puun pinnan oletetaan kestävän elinkaaren ajan, ilman että sitä joudutaan vaihtamaan.

Betonirakennuksen saumaukset korjataan kerran 20-30 vuodessa. Betonin pinnan oletetaan kestävän elinkaaren ajan, ja betonilaatu on valittu elinkaari huomioiden. Tässä betonitalon saumaukset oletetaan tehtävän kaksi kertaa 100 vuodessa.

Rakennuksen purkaminen ja materiaalien kierrätys

Rakennuksen purkamisen ilmastovaikutus on laskettu Bionova Consultingin tätä varten kehittämällä laskurilla. Purkamisen, materiaalien kierrätyksen ja hyötykäytön keinot oletetaan samoiksi kuin tällä hetkellä. Hyötykäytön päästövähennämät on arvioitu purkuajankohdan eli vuoden 2110 päästöhyödyille.

Materiaalin loppukäyttö	Puukerrostalo tn	Betonikerrostalo tn
Energiakäyttö	199	27
Uusioraaka-aineet	67	142
Betoni ja mineraalimateriaalit	1 067	2 597
Lajittelematon sekajäte	20	15
Täyttösora (jää paikalleen)	640	640
Yhteensä tonnia	1 993	3 421

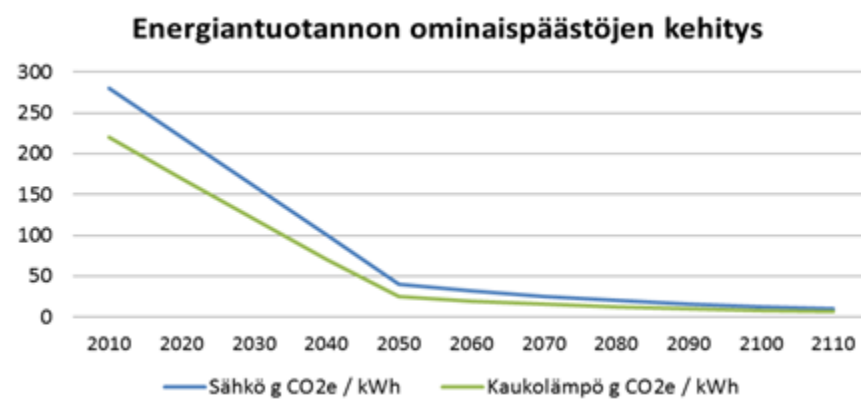
Taulukko 7 Rakennuksen purkujäte hyödyntämistavoittain.

5. Käyttöiän ja energiaratkaisujen merkitys

Energiantuotannon päästöjen kehitys

Energiateollisuus investoi vähäpäästöisiin energiantuotantomuotoihin yhteiskunnallisten tavoitteiden ohjaamana, ja näin sekä sähkön että lämmön keskimääräiset päästöt alenevat ajan mittaan. Tällä on sitä suurempi merkitys, mitä pidemmäksi rakennuksen elinkaari oletetaan. Koska kyseessä on tulevaisuutta koskeva arvio, joka riippuu poliittisesta ohjauksesta, ovat epävarmuudet hyvin suuria. Tässä ei syvennytä mahdollisiin vaihtoehtoihin energiantuotantojärjestelmän kehityskulkuihin ja kehityskulkuja ohjaaviin tekijöihin.

Lähteenä on käytetty *Energiateollisuuden Visio 2050* -julkaisua, joka olettaa että sähkön päästöt asettuvat vuonna 2050 välille 30–45 g CO₂ / kWh ja kaukolämmön päästöt tasolle 25 g CO₂ / kWh. Alla olevassa kuvaajassa on käytetty näitä lähtötietoja, ja päästövähennys on oletettu lineaariseksi välillä 2010–2050. Tämän jälkeen päästöjen on oletettu vähenevän edelleen 20 % vuosikymmenessä.



Kuva 4 Energiateollisuuden Visio 2050:een pohjautuva energian päästöjen kehitys.

Koska laskenta suuntautuu kauas tulevaisuuteen ja epävarmuus on suuri, on käytettävät laskentaoletukset yksinkertaistettu seuraavasti:

- sähkön ja kaukolämmön päästöt huomioidaan samalla kertoimella
- päästökehitys huomioidaan energian ominaispäästökertoimella, joka edustaa koko jakson keskiarvoa eri ajanjaksoille, eli 30, 50 ja 100 vuodelle.

Laskennassa käytetyt energian ominaispäästökertoimet eri ajanjaksoille löytyvät kuvasta 5.



Kuva 5 Laskennassa käytetyt energian päästökertoimet eri skenaarioille.

Rakennuksen lämmitysmuodon merkitys

PuuEra lämmitetään uusiutuvasta polttoaineesta tuotetulla kaukolämmöllä, ja tätä lämmitysmuotoa oletetaan käytettävän rakennuksessa sen koko eliniän ajan.

Jotta tuloksilla olisi merkitystä myös paikkakunnilla, joissa kaukolämpöä ei tuoteta päästöttömästi, on tulokset laskettu myös Suomen keskimääräisellä kaukolämmöllä. Muita lämmitysmuotoja kuin kaukolämpöä ei ole tarkasteltu.

Elinkaaren pituuden vaikutus laskentaletuksiin

Valittu elinkaaren pituus vaikuttaa laskennan muihin parametreihin taulukon 8 mukaisesti.

Ajanjakso	30 vuotta	50 vuotta	100 vuotta
Sisältää purkamisen	Ei	Ei	Kyllä
Hiiltä varastoituna	Kyllä	Kyllä	Ei
Kuluvat osat vaihdettu	Ei	Yhden kerran	Kaksi kertaa
Energian päästötaso g CO ₂ / kWh ajanjaksolle	170	120	70

Taulukko 8 Rakennuksen elinkaaren vaikutus laskentaletuksiin.

Hiilivarasto ei ole hiilijalanjäljen parametri, vaan se esitetään erikseen lisätietona.

6. Tulokset: asuinkerrostalon hiilijalanjälki

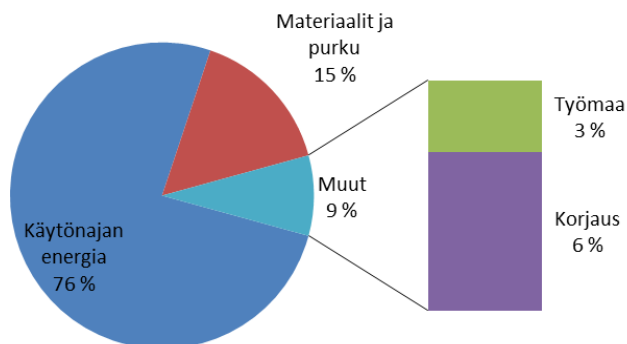
Tulosten esittämistapa

Kaikki tulokset on esitetty hiilidioksidiekvivalentteina päästöinä per lämmitetty nettoneliö per elinkaaren vuosi ($\text{kg CO}_2\text{e} / \text{m}^2 / \text{v}$). Koko elinkaaren kaikkien vaiheiden päästöt on jaettu tasan tarkastellun elinkaaren pituudelle ja asunnon nettopinta-alalle. Elinkaaren pituus on 100 vuotta, rakennuksen energialuokka passiivitaso ja lämmitystapa keskimääräinen kaukolämpö, jos muuta ei ole erikseen mainittu.

Rakennuksen elinkaaren päästöjen jakauma

Alla on esitetty rakennuksen elinkaaren päästöjen jakautuminen eri vaiheisiin, kun tarkastelun kohteena on passiivitasoinen rakennus 100 vuoden ajanjaksolla. Materiaalien ja purkamisen päästöt on esitetty samassa, sillä purkamisen päästövaikutus on negatiivinen, mikä ei muuten sovi käytettyyn esitystapaan.

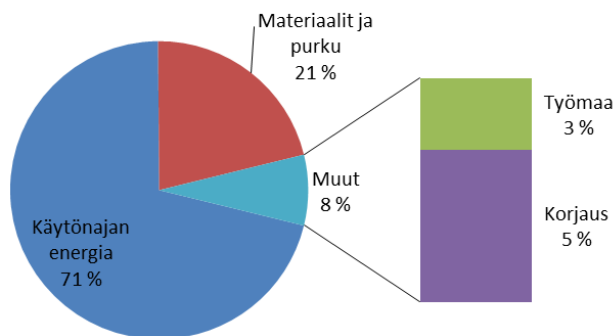
Puutalon päästöt 100 vuodessa



Kuva 6 Puutalon päästöjen suhteellinen jakauma ($9,4 \text{ kg CO}_2\text{e} / \text{m}^2 / \text{v}$).

Kuvassa 7 (seuraavalla sivulla) on esitetty vastaavan passiivitasoisen betonirakennuksen päästöjen jakautuminen 100 vuoden ajanjaksolla.

Betonitalon päästöt 100 vuodessa



Kuva 7 Betonitalon päästöjen suhteellinen jakauma (10 kg CO₂e / m² / v).

Energiatehokkuuden vaikutus tuloksiin

Peruslaskenta tehdään 100 vuoden elinkaarelle ja energian päästökertoimena käytetään 100 vuoden keskiarvoenergiaa. Hiilijalanjälki on esitetty sekä puurakenteiselle kerrostalolle (PuuEra) että vastaavalle betonikerrostalolle.

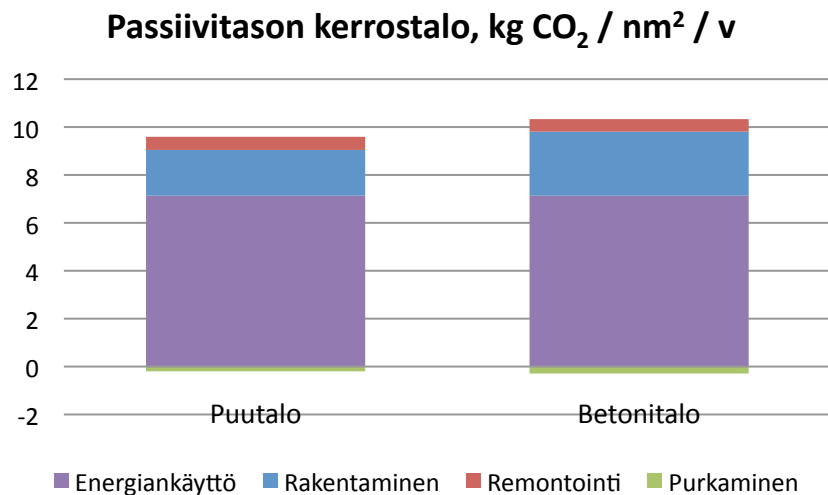
Kaikissa ratkaisuihin materiaalien ja rakentamisen päästöt on oletettu vakioiksi, mikä ei tosin toteudu käytännössä eri energialuokkien materiaalivaatimusten vuoksi. Eri energialuokkien rakentamiskokouksen päästöjen erot ovat kuitenkin vähäiset suhteessa rakennuksen elinkaaren aikaisiin päästöihin.

Eri energialuokkien elinkaaren päästöt (kg CO₂ / m² / v) löytyvät taulukosta 9.

Rakennustyyppi	D3 2012	Passiivitalo	Lähes nolla-energiatalo
Puurakentalo kg CO ₂ / m ² / v	11,1	9,4	8,0
Betonikerrostalo kg CO ₂ / m ² / v	11,8	10,0	8,6
Puutalo – energian osuus	80 %	76 %	72 %
Betonitalo – energian osuus	75 %	71 %	66 %

Taulukko 9 Rakennuksen elinkaaren päästöt eri energialuokilla 100 vuodessa.

Tuloksesta nähdään, että energialuokkien väliset erot päästöissä ovat 16–18 % kullekin energiatehokkuusluokalle ja että rakennusmääräysten mukaisen ja lähes nollaenergiatalon välinen ero on jopa 39 %. Materiaalien keskinäinen ero on 5–7 % sadan vuoden elinkaaren kokonaispäästöistä. Energiankäyttö vastaa kolmea neljäsosaa elinkaaren CO₂-päästöistä, ja kuva 8 havainnollistaa tätä.



Kuva 8 Rakennuksen elinkaaren vaiheiden vaikutus päästöihin, 100 vuoden jakso.

Elinkaaren pituus ja energian päästökerroin

Valittu elinkaaren pituus vaikuttaa rakennuksen laskennallisiin päästöihin merkittävästi, sillä rakennusmateriaalien ja rakentamisen päästöt syntyvät vain kertaalleen, ja ero syntyy sen mukaan, jaetaanko näiden päästöt 30, 50 vai 100 vuodelle. Tässä tarkastelussa merkitystä lisää se, että energian päästöille on oletettu laskeva kehitys, ja näin tuleva energiankäyttö on vähäpäästöisempää.

Lukijalle korostettakoon, että tarkastelun aikajänteellä ei ole vaikutusta todellisiin syntyviin päästöihin, vaan ainoastaan laskennallisiin päästöihin ja esitystapaan.

Skenaarioiden elinkaaren CO₂-päästöt kaukolämmöllä, kg / m² / v on esitetty taulukossa 10.

Energialuokka	Materiaali	30 v	50 v	100 v	100 v*
Määräykset 2012	Puuhybridi	28,0	19,6	11,1	30,2
Määräykset 2012	Betoni	30,5	21,1	11,8	30,8
Passiivi	Puuhybridi	23,7	16,6	9,4	24,7
Passiivi	Betoni	26,3	18,1	10,0	25,3
Lähes nolla	Puuhybridi	20,3	14,2	8,0	20,3
Lähes nolla	Betoni	22,9	15,7	8,6	20,9

Taulukko 10 Skenaarioiden elinkaaren CO₂-päästöt kaukolämmöllä (kg / m² / v).

Käytön aikaisen energian osuus elinkaaren päästöistä kaukolämmöllä on esitetty taulukossa 11.

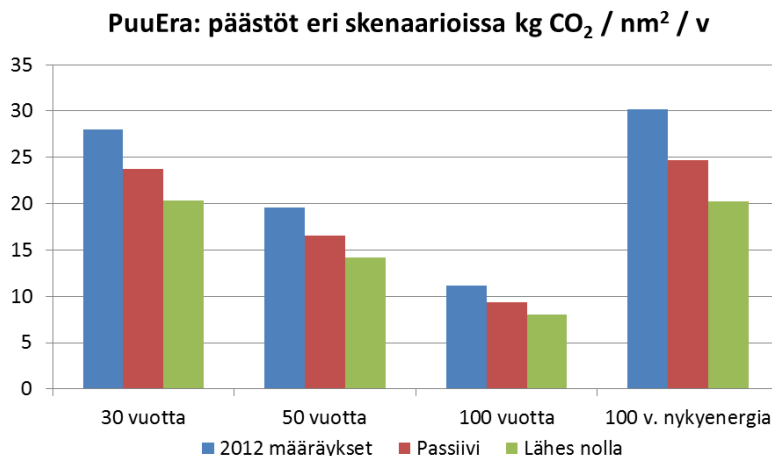
Energialuokka	Materiaali	30 v	50 v	100 v	100 v*
Määräykset 2012	Puuhybridi	77 %	78 %	80 %	93 %
Määräykset 2012	Betoni	71 %	72 %	75 %	91 %
Passiivi	Puuhybridi	73 %	74 %	76 %	91 %
Passiivi	Betoni	66 %	68 %	71 %	89 %
Lähes nolla	Puuhybridi	69 %	69 %	72 %	89 %
Lähes nolla	Betoni	61 %	63 %	66 %	86 %

Taulukko 11 Käytön aikaisen energian osuus elinkaaren päästöistä kaukolämmöllä.

* Viimeisessä sarakkeessa on esitetty vertailukohtana 100 vuoden elinkaari nykyisillä energian päästöillä, jos oletettua päästöjen vähenemää ei huomioida.

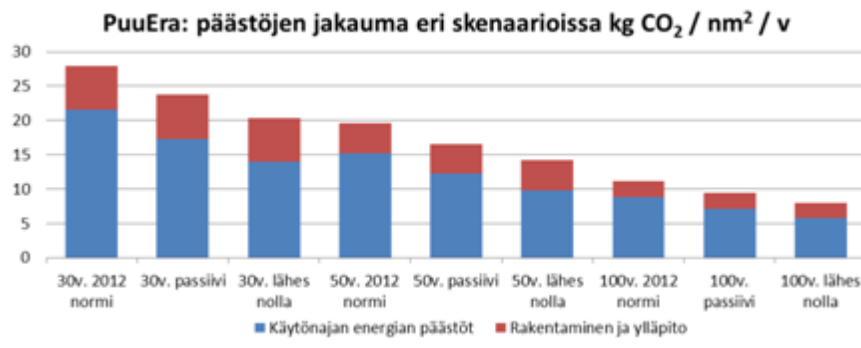
Tuloksesta nähdään, että mitä pidemmälle aikavälille tarkastelu ulotetaan, sitä pienemmiksi neliökohtaiset päästöt jäävät. Tälle on kaksi syytä: rakennuksen rakentamisvaiheen kiinteät päästöt jakautuvat useammalle vuodelle ja energian ominaispäästöjen oletetaan laskevan ajan funktiona.

Alla oleva kuva 9 havainnollistaa valitun skenaarion merkitystä tuloksiin.



Kuva 9 Rakennuksen elinkaaren pituuden ja oletusten vaikutus tuloksiin.

Kaikissa skenaarioissa käytön aikaisen energian päästöt ovat määrävssä asemassa.



Kuva 10 Rakentamisen ja ylläpidon ja käytön aikaisen energian päästöjen suhde.

Lämmitysratkaisun vaikutus elinkaaren päästöihin

Tässä esitetään lämmitysratkaisun merkitys rakennuksen elinkaaren hiilijalanjäljelle. Laskenta on tehty myös eri pituisille elinkaarille ja tarkastelun kohteena on passiivitasen kerrostalo. Lämmitysratkaisu on erittäin merkittävä valinta päästöjen kannalta, sillä Suomen kylmien olosuhteiden takia lämmityksen tarve on rakennuksissa lähes aina suurempi kuin sähkön tarve.

Uusiutuvalla energialla lämmitetyn rakennuksen hiilidioksidipäästöt on esitetty taulukossa 12.

Passiivi, uusiutuva lämmitys	30 vuotta	50 vuotta	100 vuotta
Puukerrostalo kg CO ₂ / m ² / v	13,3	9,3	5,1
Betonikerrostalo kg CO ₂ / m ² / v	15,9	10,8	5,8
Puukerrostalo, energian osuus	52 %	53 %	56 %
Betonikerrostalo, energian osuus	44 %	45 %	50 %

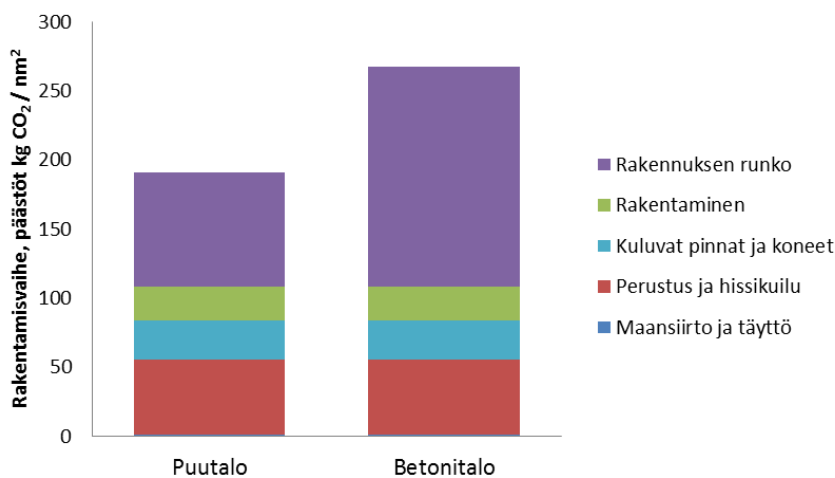
Taulukko 12 Uusiutuvalla energialla lämmitetyn rakennuksen CO₂-päästöt.

Tuloksesta nähdään, että päästötön lämmitystapa pudottaa passiivitasoisen kerrostalon elinkaaren aikaisia päästöjä noin 45 %. Lämmitysratkaisun vaikutus elinkaaren päästöihin on siis jopa suurempi kuin energiatehokkuudella. Muita lämmitysratkaisuja, kuten maalämpöä, ei tässä ole erikseen tutkittu, mutta se sijoittuisi päästötasoltaan kaukolämmön ja uusiutuvan polttoaineen välille.

Osarakenteiden vaikutus päästöihin

Puu- ja betonirakennus rakennetaan samalle perustukselle, joten maansiirron ja perustuksen ja hissikuilun päästöt ovat samat. Lisäksi rakentamisvaiheen päästöt on oletettu samoiksi, sillä molemmat rakennukset kootaan elementeistä.

Rakentamisvaiheen päästöjen jakauma



Kuva 11 Rakentamisvaiheen päästöjen jakauma puu- ja betonirakenteille.

Koko rakennusvaiheen päästöt per lämmitetty nettoneliö ovat puurakenteella noin 191 kg CO₂ / nm² ja betonirakenteella noin 268 kg CO₂ / nm², eli puurunkoisen rakennuksen rakennusvaiheen päästöt ovat 29 % pienemmät. Nämä eivät sisällä huoltoa ja purkua eivätkä materiaalien kierrätystä, joiden päästöt riippuvat osittain myös materiaalivalinnoista.

Rakennusten rakennusvaiheen päästöjen erot syntyvät rakennuksen rungosta. Tätä selittää betonirungon suurempi massa ja sen tarvitsemat materiaalit. Materiaalien vaikutus ei kuitenkaan rajoitu rakentamisvaiheeseen, sillä myös huolto ja loppuhyödyntäminen rakennuksen purkamisen jälkeen kuuluvat osaksi elinkaarta. Rakennuksen purkuvaiheessa betonirakenteen materiaalien hyötykäytöllä voidaan välttää uusiomateriaalien käyttöä ja puurakenteilla voidaan korvata fossiilisten polttoaineiden käyttöä. Lisäksi purettu ja murskattu betoni karbonatisoituu ja vähentää CO₂-päästöjä, mutta tätä ei ole huomioitu tuloksissa.

Rakenteiden hiilivarasto

Rakennuksen puuosat varastoivat hiiltä. Tämä hiilivarasto on syntynyt metsässä puun kasvaessa, ja varasto on siirtynyt rakennusmateriaalin muodossa metsästä rakennukseen. On tärkeää huomata, että rakentaminen ei itsessään luo hiilivarastoja, vaan siirtää ne metsästä rakennuksiin.

Rakennustyyppi	Puukerrostalo	Betonikerrostalo
Puurakenteita, % massasta	10 %	1 %
Hiilivarasto, tn CO ₂	306	37
Hiilivarasto kg CO ₂ / nm ²	148	18

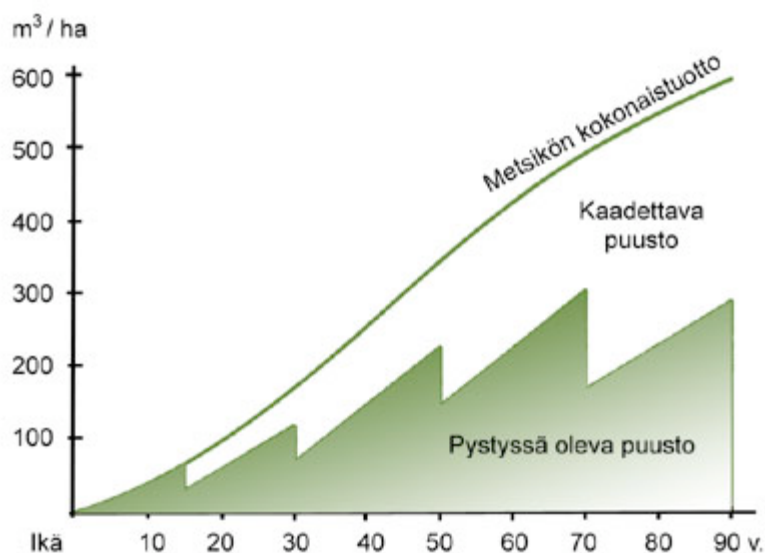
Taulukko 13 Rakennusten puuosiin varastoitunut hiili.

Hiilivarasto on olemassa kunnes rakennus puretaan, jonka jälkeen polttokelpoinen rakennusjäte useimmiten poltetaan. Tällöin materiaalin sisältämä hiili muuttuu hiilidioksidiksi ja näin osallistuu ilmaston lämmittämiseen. Laskennassa puun polttamisesta syntyviä hiilidioksidipäästöjä ei huomioida käytön aikana eikä rakennusmateriaaleja poltettaessa, sillä puu on uusiutuva polttoaine. Lisäksi puuta polttamalla voidaan katsoa korvattavan muita kohdevoimallaitoksessa käytettäviä polttoaineita, jotka ovat usein fossiilisia ja näin korkeapäästöisiä.

Hiilivarastojen huomiointi hiilijalanjälkiä laskiessa on keskustelun aiheena kansainvälisessä ympäristöstandardoinnissa sekä kansallisessa päätöksenteossa. Hiilivarastojen tarkasteluun liittyy useita teknisiä seikkoja, mm. maaperään, metsiin ja tuotteisiin sitoutuneita hiilivarastoja kohdellaan eri tavoin. Ajatuksena hiilivarastojen huomioinnissa on antaa hyvitystä niistä päästöistä, jotka syntyvät myöhemmin, koska näin katsotaan voitavan hillitä ilmastomuutosta.

Tässä raportissa hiilivarastoa ei ole vähennetty rakennuksen hiilijalanjälkituloksista. Tässä ei syvennytä enempää hiilivarastojen filosofiaan, vaan todetaan että rakennukseen on sitoutunut esitetty määrä hiilidioksidia, ja että se vapautuu, kun rakennus puretaan ja sen materiaalit hävitetään, joista puu hävitetään polttamalla.

Rakennuksen hiilivarasto on syntynyt metsässä puun kasvaessa (katso kuva 12), ja rakennettu rakennus ei suoranaisesti ole vaikuttanut hiilivaraston syntyyn, mutta vaikuttaa sen pitkäaikaiseen varastointiin.



Kuva 12 Puuston tuotto ja pystyssä oleva puusto (Pro Puu ry / Stig Nordman).

Hiilivarastojen huomiointiin on olemassa vaihtelevia käytäntöjä, mm. brittiläinen tuotteiden hiilijalanjälkien laskentatapa PAS 2050 mahdollistaa hiilivarastojen vähentämisen hiilijalanjäljestä rakennuksen oletettuun eliniän pituuteen perustuen. PAS 2050:n mukaan myös muut viivästetyt päästöt huomioidaan diskonttaus-kertoimella. ISO:n tuleva 14067-standardi ottaa kantaa hiilivarastoihin, samoin kuin *Greenhouse Gas Protocol for Products* -laskentamenetelmä. Myös eurooppalainen standardisointiorganisaatio CEN on lanseerannut eurooppalaisen rakennusalan ympäristöstandardiperheen, josta mainittakoon prEN 15643-1 *Sustainability Assessment of Buildings*.

Vähentämällä hiilivarastot hiilijalanjäljestä muuttuisivat tulokset huomattavasti. Tässä rakennuksen elinkaareen on huomioitu rakennuksen purku ja materiaalien hyödyntäminen joko energiana tai materiaalina, ja näin ollen varastoitu hiili vapautuu ilmakehään ennen tarkastelun loppupistettä.

7. Johtopäätökset

Johtopäätökset rakennuksen elinkaaren hiilijalanjäljestä

Tässä hankkeessa saadut tulokset koskevat Rakennusliike Reponen Oy:n rakentamaa puuhybridikerrostaloa, jonka rakenne perustuu liimapuuelementteihin, pilari-palkkirunkoon ja ohueen betonikerrokseen välipohjissa. Rakennusta on verrattu vastaavaan passiivitasoiseen betonielementtitaloon. Tuloksia ei voida suoraan yleistää eri toteutustavoille tai rakenteille.

Rakennuksen elinkaaren päästöt (kg CO₂e / nm² / v) eri energialuokille näkyvät taulukosta 14.

Päästöt, kaukolämpö	30 vuotta	50 vuotta	100 vuotta
Määräykset 2012	28,0 - 30,5	19,6 - 21,1	11,1 - 11,8
Passiivenergiatalo	23,7 - 26,3	16,6 - 18,1	9,4 - 10,0
Lähes nollaenergiatalo	20,3 - 22,9	14,2 - 15,7	8,0 - 8,6

Taulukko 14 Rakennuksen elinkaaren päästöt eri energialuokille ja aikajänneille.

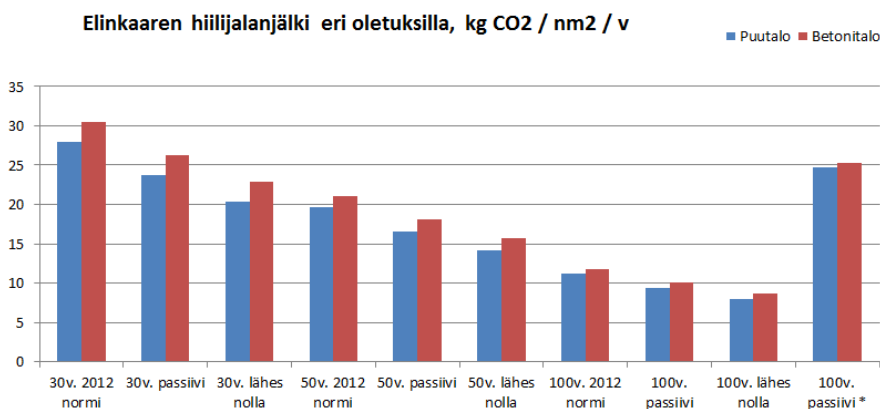
Koska rakennus on suunniteltu kestävänsä 100 vuotta, pidetään tätä aikajännettä rakennuksen teknisenä ja näin ollen laskennan elinkaarena. Tämän selvityksen perusteella passiivenergiatasoisen asuinkerrostalon 100 vuoden koko elinkaaren aikana syntyvistä hiilipäästöistä voidaan todeta seuraavaa:

1. Rakennuksen energiatehokkuus on tärkein kaikkialla käytettävissä oleva keino vähentää rakennuksen elinkaaren aikaisia päästöjä. Myös energiatehokkaassa rakennuksessa energian osuus elinkaaren päästöistä on kaksi kolmasosaa. Parantamalla vuonna 2012 voimaan astuvien rakennusmääräysten mukainen rakennus passiivitasoiseksi vähenevät elinkaaren päästöt noin 18 % ja tehtäessä lähes nollaenergiatasoinen talo vähenevät elinkaaren päästöt 39 %.
2. Siellä, missä se on mahdollista, päästöttömän lämmitysratkaisun valinta on tehokkain keino vähentää rakennuksen elinkaaren aikaisia päästöjä. Päästötön lämmitys voi vähentää elinkaaren päästöjä jopa 45 %.
3. Puuhybriditalon varastoima hiili vastaa 16 % ja betonirakennuksen 2 % rakennuksen elinkaaren aikaisista päästöistä. Hiilivarastoa ei ole vähennetty elinkaaren aikaisista päästöistä. Hiilivarasto säilyy, kunnes puuosat poltetaan.

4. Rakennusmateriaalit vaikuttavat pääasiassa rakennusvaiheen päästöihin. Rakennusvaiheessa syntyneen eron vuoksi puu- ja betonikerrostalon välinen päästöero on 5–7 % sadan vuoden aikajänteellä puurakenteen eduksi, energiatehokkuudesta riippuen. Jos tarkastelun aikajänne on 30 vuotta, on materiaalien ero 8–11 % ja 50 vuoden aikajänteellä 7–10 % puun eduksi. Jos tarkastellaan pelkkää rakennusvaihetta, ovat päästöt puurakenteella noin 191 kg CO₂ / nm² ja betonirakenteella noin 268 kg CO₂ / nm², eli puurunkoisen rakennuksen rakennusvaiheen päästöt ovat 29 % pienemmät.
5. Rakennustyömaan päästöjen osuus koko elinkaaren päästöistä on vähäinen (noin 3 %), mutta rakennuksen kunnossapidolla ja remontoinnilla on selvästi tätä suurempi painoarvo, noin 6 % rakennuksen elinkaaren päästöistä. Tämä tekeekin kestävästä, muunneltavista ja rakennuksen koko elinkaaren kestävästä ratkaisusta entistä mielenkiintoisempia ja ympäristötehokkaampia.

Laskentamenetelmiin ja oletuksiin liittyvät huomiot

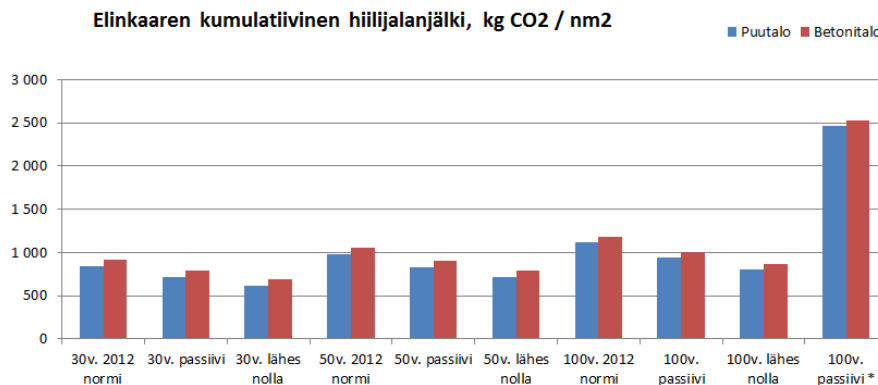
Viime vuosina on julkaistu runsaasti rakennusalaan koskevaa ympäristötutkimusta. Tässä selvityksessä on pyritty avaamaan mahdollisimman selkeällä tavalla eri oletusten ja laskentatapojen vaikutusta lopputulokseen. Kuvaajat alla havainnollistavat raportissa esitettyjen erilaisten laskentaskenaarioiden tulokset.



Kuva 13 Laskennassa käytetyt oletukset vaikuttavat huomattavasti tulokseen.

* kuvaa 100 vuoden passiivirakennusta, jos energian päästöt säilyvät nykytasolla

Kuva 13 havainnollistaa raportissa esitettyjen erilaisten laskentaskenaarioiden tulokset vuotta kohti. Kuva 14 (seuraavalla sivulla) esittää samat tulokset kumulatiivisina koko elinkaaren aikaisina päästöinä.



Kuva 14 Koko elinkaaren kumulatiiviset päästöt osoittavat erot selvemmin.

* kuvaa 100 vuoden passiivirakennusta, jos energian päästöt säilyvät nykytasolla

Muiden muuttujien, kuten korjausrakentamisen ja hiilivaraston, vaikutusta lopputulokseen ei ole mallinnettu, mutta niitä käydään läpi seuraavassa.

Selvityksen perusteella seuraavat tekijät vaikuttavat merkittävästi tuloksiin:

1. Tarkastelujakson pituus vaikuttaa olennaisesti saatuun tulokseen. Tarkasteluun otettujen 30, 50 ja 100 vuoden elinkaarten päästöerot samalle rakennukselle olivat enimmillään 2,5-kertaisia. Tämä johtuu sekä energian päästöjen kehityksestä että rakennusvaiheen päästöjen kertaluonteisuudesta.
2. Laskennassa käytetty pitkän aikavälin energian päästökerroin on olennainen tekijä tulosten kannalta. Jos energian päästöjen ei oleteta laskevan tai niiden oletetaan laskevan tässä esitetyllä tavalla, on päästöero noin 2,5-kertainen.
3. Puurakenteiset rakennukset sitovat hiiltä rakenteisiinsa rakennuksen purkuun ja materiaalien kierrätykseen saakka. Hiilivarastojen vähentäminen rakennuksen elinkaaren päästöistä vaikuttaa tulokseen merkittävästi. Käytännössä rakennuksen puumateriaalien loppuhyödyntämistapa on näköpiirissä olevassa tulevaisuudessa poltto, joka vapauttaa materiaaleihin varastoituneen hiilidioksidin, mutta samalla korvaa fossiilisia polttoaineita energiantuotannossa. Myös tulosten läpinäkyvyyden kannalta on perusteltua esittää mahdolliset hiilivarastot erillisenä arvona.
4. Myös rakennustyömaan energian kulutuksella, rakennuksen ylläpidolla ja purkamisella ja hyötykäytöllä on vaikutusta päästöihin. Vaikka näiden merkitys ei olekaan kokonaisuudessa suurimpia, vastaa yhdenkin näistä vaiheista poisjättäminen suuruusluokaltaan betoni- ja puurakenteisen rakennuksen välille tässä tarkastelussa syntynyt päästöeroa.

5. Tarkasteluun mukaan otettavien materiaalien määrällä on suuri vaikutus tuloksiin. Materiaalien välinen prosentuaalinen päästöero riippuu muiden oletusten lisäksi siitä, tarkastellaanko koko rakennusta vaiko vain yksittäistä osarakennetta. Jos rakennusta tarkastellaan vain runkona ilman perustusta, pinnoitteita ja talotekniikkaa, ovat saatavat tulokset pienempiä ja näin niiden prosentuaaliset erot suurempia. Toisaalta, jos rakennukseen otetaan mukaan kalusteet ja esim. asukkaiden jätehuolto, kasvaisivat saatavat tulokset huomattavasti ja samalla tulosten prosentuaaliset erot kaventuvat.

Rakennus on kokonaisuus, ja asuinrakennuksen käyttötarkoitus on asuminen. Tarkastelemalla vain osakokonaisuuksia rakennuksesta tai vain osia rakennuksen elinkaaresta tulokset muuttuvat. Vain valittujen osien optimointi antaa heikon lähtökohdan rakennuksen kokonaisympäristövaikutuksen vähentämiseen.

Tulosten yleistäminen ja epävarmuustekijät

Tässä hankkeessa saadut tulokset koskevat Rakennusliike Reponen Oy:n rakentamaa puuhybridikerrostaloa, jonka rakenne perustuu liimapuuelementteihin, pilari-palkkirunkoon ja ohueen betonikerrokseen välipohjissa. Rakennusta on verrattu passiivitasoiseen betonielementtirakennukseen. Tuloksia ei voida yleistää muihin rakenteisiin tai toteutustapaan perustuviin rakennuksiin.

Laskennassa on käytetty oletuksia silloin, kun tietoa ei ole ollut saatavilla toimittajilta. Tietyissä tapauksissa toimittajien tietojen sijasta on käytetty muun, vastaavaa tuotetta tai materiaalia toimittavan yrityksen tietoja.

Tuloksiin liittyy erilaisia epävarmuustekijöitä, joista tärkeimmät ovat lasketusta materiaalitaseesta poikkeaminen, todellisuuden poikkeaminen lasketusta energiatehokkuudesta, moniportaisten materiaaliveirtojen jäljittämisestä syntyneet virheet, laskennasta puuttuvat vaikutukset (mm. karbonatisaatio), oletus eri materiaalien käytön aikaisesta samasta energiantarpeesta, oletukset energian päästöistä ja materiaalien päästöjen laskennassa käytetyt päästökerrointiedot. Kokonaisuutena epävarmuudet kuitenkin eivät näytä niin suurilta, että ne vaikuttaisivat tulokseen merkittäväällä tavalla.

Materiaaleja vertailtaessa on olennaista myös huomioida materiaalin ominaisuuksien hyödyntäminen. Tässä molemmat rakennukset rakennettaisiin PuuEran suunnitelmien pohjalta. Tämä johtaa betonirakennuksen osalta mahdollisesti suurempiin päästöihin, koska rakennus on optimoitu puurakenteelle.

Johtopäätöksiä rakennusosalalle

Koko rakennusalan kannalta tulokset ovat rohkaisevia, sillä ne tuovat selkeästi esille energiatehokkuuden potentiaalin parantaa rakennusten päästötasetta. Materiaali- ja energiatehokkuuden kehittäminen palvelevat sekä vähähiilisen yhteiskunnan rakentamista että rakentajien taloutta.

Rakentamisen laatu on olennaista myös päästötehokkuuden saavuttamiseksi. Esimerkiksi rakenteiden ilmatiiveys on olennaista lämmön kulutukselle, samoin rakenteiden ja eristeiden suojaaminen kosteudelta rakennusvaiheen aikana.

Rakenneratkaisuilla voidaan vaikuttaa rakennuksen lämmitys- ja jäähdytysenergian tarpeeseen. Rakennustuotteiden pitkään käyttöikään panostamisella saadaan kevennettyä korjaamisesta syntyvää ympäristöhaittaa sekä korjaamiskustannusta.

Betonirakennuksissa on mahdollista lisätä puun käyttöä mm. väli- ja ulkoseinissä. Merkittävänä hyötynä tälle yhdistelmälle on se, että betonirakentajan ei tarvitse opetella uutta rakentamistapaa, joka on tarpeen, kun rakennus tehdään puurunkoisena. Näin puun käyttöä voitaisiin lisätä rakentamisessa nopeasti. Lisäksi betonirakenteiden hiilitehokkuuteen voidaan vaikuttaa sementti- ja betonilaatujen valinnalla. Hiilitehokkaat betonit soveltuvat useisiin rakennusten käyttökohteisiin.

Selvitys tuo esiin useita elinkaariarvioinnin tulosten vertailukelpoisuuteen liittyviä ongelmia. Tässä valossa katsottuna onkin perusteltua, että elinkaariarviointia päätöksenteossa hyödyntävät tahot harkitsevat tarkkaan, kuinka voidaan varmistaa tulosten yhdenmukaisuus, vertailukelpoisuus ja luotettavuus. Hiilitehokkuuteen perustuvia väittämiä on helpompi tulkita väärin kuin energiatehokkuutta, joka ymmärretään ja tunnetaan paremmin.

Elinkaariarvioinnin ja rakennusalan ympäristöstandardointi etenee nopeasti. Tulosten vertailtavuuden ja kustannustehokkuuden kannalta on perusteltua hyödyntää sellaisia laskentamenetelmiä, joita hyödynnetään laajasti Euroopassa.

Laskentamenetelmien käyttäminen ei vielä itsessään paranna rakennuskannan energia- ja ympäristötehokkuutta. Tärkeintä ympäristön kannalta on, että energiatehokkuuteen ohjaavia päätöksiä toteutetaan, jotta toimiala saavuttaa riittävän volyymin energiatehokkaiden ratkaisujen kustannustehokkuuteen.

Muita näkökulmia

Hiilijalanjälki on ilmastovaikutusten mittari, eikä huomioi rakennuksen vaikutuksia muihin ympäristötekijöihin, yhteiskuntaan, asukkaisiin tai kansantalouteen. Tässä kappaleessa on nostettu esille muutamia tämän tarkastelun ulkopuolisia, mutta huomionarvoisia tekijöitä. Tässä ei ole pyritty luettelemaan kaikkia muita asuin-kerrostalojen kannalta relevantteja näkökulmia.

Tarkasteluun valitut rakennukset käyttävät vain ostoenergiaa. Tuottamalla osa rakennuksen energiantarpeesta kohteessa aurinko-, tuuli- tai geotermisellä energialla voidaan vähentää ostoenergian kysyntää ja siitä syntyviä päästöjä tehokkaasti. Toisaalta tällöin elinkaaren päästöt kasvavat energiantuotanto-laitteistojen valmistusta, huoltoa, korjausta ja kierrätystä vastaavalla määrällä.

Sekä puu- että betonirakentamisessa kulutetaan merkittävästi luonnonvaroja. Kun tarkastellaan rakennushanketta kokonaisuutena, nähdään että puusta tehtyjen uusiutuvien materiaalien osuus on 10 % puurunkoisen rakennuksen massasta. Betonirakennuksessa vastaava osuus on noin 1 %. Suurimmat massat syntyvät molemmissa rakennuksissa täyttösorasta ja betonista. Rakennuksessa käytettävistä raaka-aineista kierrätysraaka-aineita löytyy lähinnä metalleista, joissa keskimääräinen kierrätetyn raaka-aineen osuus on korkea. Myös rakennusta purettaessa betonin ja muiden mineraaliperäisten materiaalien osuus on suurin erä. Lisäksi rakennuksesta syntyy energiajätettä ja materiaalia uusioraaka-aineisiin. Kokonaisuutena rakennus saadaan purkuvaiheessa hyvin hyötykäytettyä valitusta rakennusmateriaalista riippumatta.

Rakennusmateriaalien tuotannon päästöjä hallitaan eurooppalaisen päästökauppa-mekanismin kautta. Päästökauppa koskee energiantuotannon lisäksi useita rakennusmateriaalien valmistajia. Eurooppalaisen päästökaupan alaisia toimialoja ovat rautametallien tuotanto ja jalostus, mineeraliteollisuus (sementtiklinkkeri, lasikuidut, keramiikka ja tiilet) ja laitokset, jotka valmistavat massaa puusta tai muista kuitumateriaaleista. Päästökauppa kattaakin käytännössä useimmat merkittävät rakennusmateriaalien valmistajat. Koska rakennusmateriaalien päästöjä vähennetään jo päästökaupan keinoin, on mahdollisen päällekkäisen säätelyn tarve ja mahdollisuus harkittava tarkkaan kansallisen tuotannon kilpailukyyn turvaamiseksi.

Puupohjaisten eristemateriaalien käyttö ei kirjoitushetkellä ole mahdollista tutkitun kohteen kaltaisissa kerrostaloissa palomääräysten vuoksi. Jos paloturvallisuus voidaan varmistaa, määräyksiä kehittämällä ja puupohjaisten eristeiden käytöllä voitaisiin keventää rakennusten elinkaaren aikaisia päästöjä entisestään.

Tässä hankkeessa ei ole tarkasteltu rakennuksen taloudellisia vaikutuksia rakentajan, omistajan, asukkaan eikä kansantalouden näkökulmista. Erityisesti puurakentamisella on mahdollisuuksia luoda uusia työpaikkoja ja lisätä vientiä. Tällä hetkellä suuri osa suomalaisesta puurakentamisen viennistä tapahtuu rakennusmateriaalien muodossa, jolloin jalostusaste ja positiivinen vaikutus kansantalouteen jäävät rajallisiksi. Kilpailukykyisten ja tuotteistettujen puurakennusten vienti edellyttää toimivaa, kilpailuun perustuvaa ja riittävän suurta kotimarkkinaa, jotta alan toimijat pystyvät kehittämään riittävän osaamisen ja verkostot vientimarkkinoille. Tästä näkökulmasta puurakentaminen tarjoaa merkittävän kasvumahdollisuuden.

Lähdeluettelo

Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework (ISO 14040:2006).

Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines (ISO 14044:2006).

Direktiivi 2010/31/EU rakennusten energiatehokkuudesta (uudelleen laadittu).

Publicly available specification PAS 2050:2011. Specification for the assessment of the life cycle greenhouse gas emissions of goods and services.

Haasteista mahdollisuuksia — sähkön ja kaukolämmön hiilineutraali visio vuodelle 2050, Energiateollisuus 2010.

Www-sivusto puuera.fi.

Liite: Käytetyt päästökertoimet

Alla oleva luettelo esittää laskennassa käytetyt julkaistut ympäristöselosteet. Hankkeessa ei ole pyritty käyttämään julkisia lähteitä, vaan tarkimpia mahdollisia lähdetietoja joita kohteelle on voitu saada, ja näin julkisten lähteiden kattavuus on rajallinen. Alla olevat arvot vastaavat joko materiaalin päästökerrointa kehdestä hautaan, tehtaan portille tai kuljetettuna rakennuspaikalle, lähteestä riippuen.

Materiaali	Julkaistu lähde	Päästökerroin kg CO ₂ e
Puuliima	Akzo Nobel: Our glues, your health and the environment	2,8 / kg
Muovimatto	ERFMI EN 548 Linoleum	5,942 / m ²
Muovimatto	ERFMI EN 694 Heterogeneous PVC	12,859 / m ²
Sementti	Finnsementti Rapidsementti ympäristöseloste	0,702 / kg
Kipsilevy	Gyproc ympäristöseloste	0,386 / kg
Hissi	Schindler 3100 ympäristöseloste	3 505 / hissi
Laatat	Pukkila ympäristöseloste	0,618 / kg
Höyrynsulkumuovi	Raniplast Carbon footprint PE film	1,83 / kg
Kuljetukset	VTT Lipasto, osoitteessa lipasto.vtt.fi	

Taulukko 15 Laskennassa käytetyt julkaistut ympäristöselosteet.

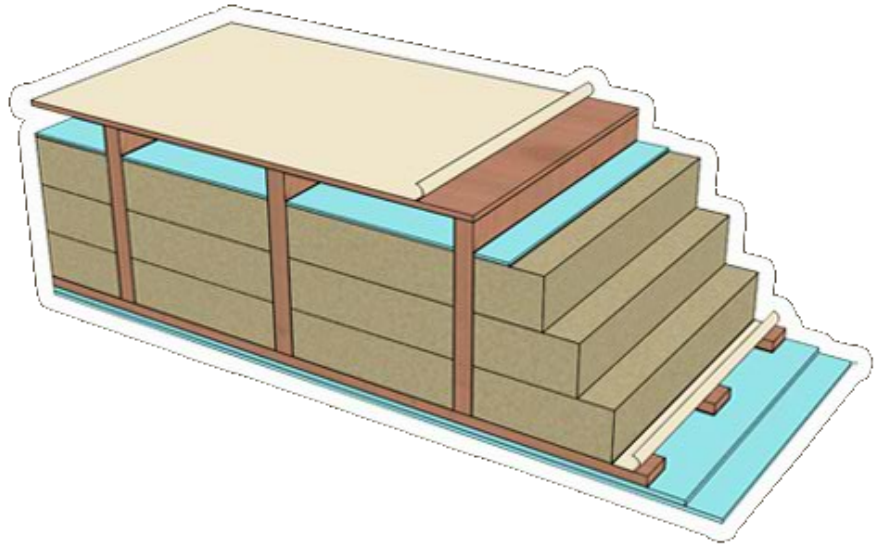
Muut ei-julkiset työssä käytetyt lähteet on lueteltu alla.

Prosessitason tietoja on käytetty seuraavien toimijoiden päästöjen laskennassa: Rakennusliike Reponen Oy, Versowood Oy, Koskisen Oy, LS Laatusiin Oy.

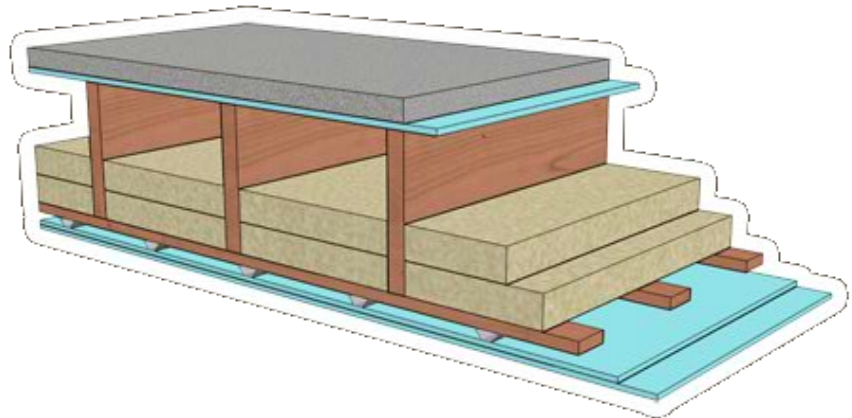
Toimijoiden omia elinkaariarviointeja on käytetty seuraavien toimijoiden osalta: Saint Gobain Isover (mineraalivilla), Paroc (kivivilla).

Lisäksi mm. seuraavien toimijoiden antamia osittaisia tietoja tai tiedonantoja on hyödynnetty laskennassa: Kaskipuu Oy (ovet), Swegon ILTO (IV-koneet), Thermisol (EPS-eriste), Kerabit Oy (kattopinnoite), Puuinfo (puun ominaisuudet), Ponsse Oyj (puun korjuukoneiden kuluttama polttoaine), Pihlavan ikkuna Oy.

Ecoinvent, osoitteessa <http://www.ecoinvent.ch/>.



Kuva 17 Leikkaus yläpohjasta (Verso – yläpohjajaelementit).



Kuva 18 Leikkaus välipohjasta (Verso – välipohjajaelementit, huoneistojen väliset).

Muita rakenneratkaisuja ja yksityiskohtia on kuvattu PuuEran sivustolla puuera.fi.