ASIAKASRAPORTTI

VTT-CR-04958-17| 25.9.2017

Rakentamisen hiilivarasto

Kirjoittajat: Sirje Vares, Tarja Häkkinen Terttu Vainio

Luottamuksellisuus: julkinen

Raportin nimi
Rakentamisen hiilivarasto

Asiakkaan nimi, yhteyshenkilö ja yhteystiedot	**Asiakkaan viite**
Ympäristöministeriö	DNRO YM67/612/2017
Projektin nimi	**Projektin numero/lyhytnimi**
Rakentamisen hiilivarasto	116104 - Rakentamisen hiilivarasto

Tiivistelmä

Tavoitteena oli suorittaa arvio suomalaisen rakennuskantaan sitoutuneen hiilen varastosta ja eri rakennustapojen vaikutuksesta hiilivaraston kehittymiseen. Arvion lähtökohtana oli lisäksi, että substituutiovaikutuksena otetaan huomioon päästöjen väheneminen korvattaessa betonirakenneratkaisuja samat toimivuusvaatimukset täyttävillä puurakenne-järjestelmillä.

Tuloksien mukaan puukerrostalojen materiaalipohjaiset kasvihuonekaasupäästöt eri puurakennusjärjestelmillä ovat noin 156...170 kgCO_2e/br-m^2. Silloin kuin puukerrostalon ensimmäinen kerros on betonia ja muita kuin puumateriaaleja käytetään enemmän, puukerrostalojen hiilijalanjälki on lähellä 200 kgCO_2e/br-m^2.

Suomen rakennuskannan hiilivaranto on 22 838 1000 tonnia C (ilman kiintokalusteita). Eniten hiilivarantoa on erillisissä pientaloissa (A01; 31 %) ja infrarakenteissa (16 %). Puukerrostalojen osuus valmistuneista kerrosneliöistä on ollut erittäin pieni, mutta potentiaali kasvattaa volyymiä on suuri. Puukerrostalojen hiilisisältö, laskettuna CO_2:na, oli 149...298 kg CO_2/br-m^2.

Kasvattamalla puukerrostalojen rakentamisen osuutta, esimerkiksi 130 000 m^2, voitaisiin kasvattaa väliaikaista hiilivarastoa noin 14 200 tonnia ... 33 600 tonnia (riippuen käytetystä puurakennejärjestelmästä).

Puukerrostalojen substituutiovaikutuksena säästyisi kasvihuonekaasuja puurakennusjärjestelmästä riippuen 113...125 kg/m^2. Kasvihuonekaasupäästöjen säästöt olisivat 14 700 tonnia ... 16 300 tonnia, jos 130 000 k-m^2 betonirakentamista korvattaisiin puukerrostalojen rakentamisella.

Talonrakennuskannan hiilivaranto on kasvanut vuodesta 2000 vuoteen 2016 noin 23 %. Samaan aikaan rakennuskannan kerrosala on kasvanut 30 %. Hiilivarannon hitaampi kasvu johtuu talonrakennustuotannon rakenteesta. Hiiltä paljon varastoivien pientalojen sijaan on rakennettu kerrostaloja. Puun käyttö ympäristörakentamisessa (vähäiset rakennukset, piharakenteet, infrarakenteet) on kasvattanut suosiota ja hiilivaranto onkin näissä rakenteissa kasvanut 34 %.

Espoo, 25.9.2017

Laatija	**Tarkastaja**	**Hyväksyjä**
Sirje Vares, erikoistutkija	Tarja Häkkinen, johtava tutkija	Jari Shemeikka, tiimipäällikkö

VTT:n nimen käyttäminen mainonnassa tai tämän raportin osittainen julkaiseminen on sallittu vain Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy:ltä saadun kirjallisen luvan perusteella.

Sisällysluettelo

Sisällysluettelo 2
1 Johdanto 3
1.1 Tausta ja tavoitteet 3
2 Substituutiopotentiaali rakennustasolla uudisrakentamisessa 6
2.1 Johdanto 6
2.2 Lähtötiedot 6
2.2.1 Mallirakennus 6
2.2.2 Rakennejärjestelmät 8
2.2.3 Rakentaminen 15
2.2.4 Rakennuksen käyttö 15
2.3 Laskentatulokset 16
2.3.1 Kerrostalomateriaalien hiilijalanjälki ja hiilisisältö (A1-A4) 16
2.3.2 Kerrostalojen 50 vuoden käyttö 20
2.3.3 Kerrostalojen elinkaaren päätösvaihe (C3) 22
2.4 Johtopäätökset 23
3 Substituutiopotentiaali rakennustasolla korjausrakentamisessa 25
3.1 Johdanto 25
3.2 Lähtötiedot 25
3.3 Tulokset 26
3.4 Johtopäätökset 26
4 Hiilivarasto rakennuskannan tasolla 27
4.1 Johdanto 27
4.1.1 Talonrakennuskannan laajuus ja puisten rakennusosien määrä 27
4.1.2 Muut puurakenteet 29
4.1.3 Puisten rakennusosien hiilisisältö 29
4.2 Tulokset 29
4.3 Yhteenveto 35
5 Herkkyystarkastelut, merkityksen ja potentiaalien tarkastelu 37
5.1 Johdanto 37
5.2 Herkkyystarkastelut 37
6 Yhteenveto 42
Liitteet /Lähdeviitteet 43

1 Johdanto

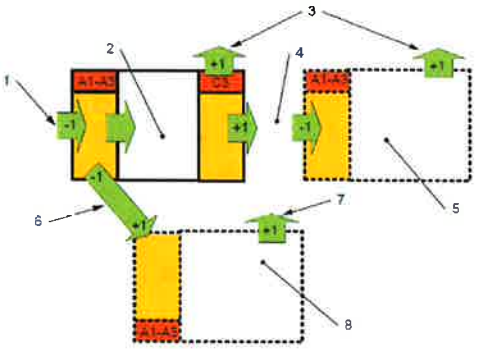
1.1 Tausta ja tavoitteet

Suomalaisten metsien arvioitu hakkuiden lisäys pienentää metsien hiilinielupotentiaalia. On tarpeen selvittää hiilen kiertoa metsästä tuotteisiin ja takaisin ilmakehään sekä tämän kierron aikana tapahtuvaa hiilen varastoitumista puukuidun eri hyödyntämisvaihtoehdoissa.

Puun sisältämä hiili on varastoitunut puutuotteisiin, puurakenteisiin ja puurakennuksiin koko tuotteen käyttöiän ajaksi. Standardi EN 16485[1] antaa ohjeet puutuotteisiin sitoutuneen hiilen huomioon ottamisesta elinkaarilaskennassa. Kun puutavara on hankittu kestävästi hoidetuista metsistä, tämä hiilisisältö huomioidaan elinkaarilaskennoissa miinus merkkisenä hiilidioksidina elinkaaren tuotevaiheessa (A1-A3) (EN 15978:2011)[2].

> *Kestävässä metsänhoidossa puuta kasvaa vuoden aikana enemmän kuin sitä hakataan ja kun puuston kasvu sitoo enemmän hiiltä kuin mitä hakkuut ja lahoaminen vapauttavat silloin metsät toimivat hiilinieluna. Kestävä metsähoito varmennetaan metsien sertifioinnilla.*

EN 15978 standardin mukaan elinkaaren päätösvaiheessa (puun käsittely ja poltto lämmöntuotannossa, vaihe C3) varastoitunut eloperäinen hiili palaa takaisiin päästönä ilmastoon (Kuva 1). Kun puutuote siirtyy seuraavaan käyttökohteeseen (Kuva 1, tuotejärjestelmään 5), silloin tuotteen jatkokäytön mukana seuraa myös hiilivarasto.



Kuva 1. Eloperäisen hiilen huomioon ottaminen elinkaarilaskennassa, kun puutuotteet ovat hankittu kestävästi hoidetuista metsistä (EN 16485) (1 = eloperäisen hiilen siirtyminen puutuotteena järjestelmään, 2 = elinkaaren tuotevaihe (A1 - A3), 3 = eloperäisen hiilen poistuminen järjestelmästä päästönä (elinkaarivaihe C3), 4 = puutuotteen kierrätys, 5 = tuotejärjestelmä joka ottaa vastaan kierrätetyn puutuotteen, 6 = puutuotteiden rinnakkaistuote jota hyödynnetään järjestelmässä 8, 7 = järjestelmän 8 päästöt ympäristöön (EN 16485:2014).

Tämän selvityksen tavoitteena oli suorittaa arvio suomalaisen rakennuskantaan sitoutuneen hiilen varastosta ja eri rakennustapojen vaikutuksesta hiilivaraston kehittymiseen. Arvion lähtökohtana oli lisäksi, että substituutiovaikutuksena otetaan huomioon päästöjen väheneminen korvattaessa betonirakenneratkaisuja samat toimivuusvaatimukset täyttävillä puurakennejärjestelmillä.

---

[1] EN 16485:2014 Round and sawn timber - Environmental Product Declarations - Product category rules for wood and wood-based products for use in construction

[2] EN 15978:2011 Sustainability of construction works — Assessment of environmental performance of buildings — Calculation method.

- Puun käytön substituutiopotentiaali rakennustasolla uudisrakentamisessa,
- Puun käytön substituutiopotentiaali rakennustasolla korjausrakentamisessa,
- Rakennuskannan eloperäinen hiilivarasto
- Merkityksen ja potentiaalien tarkastelu sekä herkkyystarkastelut

Rakentamisessa käytettäviä puutuotteita ovat sahatavara, puupalkit ja pilarit, liimapuu, kertopuu, CLT, lastulevy, vaneri ja kuitulevy. Lisäksi rakentamisessa on perinteisesti käytetty eristeenä sahapurua ja nykyisin muita puupohjaisia eristeitä, kuten selluvillaa ja kierrätystuotteena valmistettua paperieristettä. Puuhun ja näin ollen myös puutuotteisiin on varastoitunut hiiltä puun kasvukauden aikana.

Toisaalta puutuotteiden valmistuksessa käytetään polttoaineita, jotka aiheuttavat fossiilisia hiilipäästöjä ympäristöön. Puurakentamisen kasvihuonekaasupäästöt selvitettiin ja tulos ilmoitettiin hiilijalanjälkiarvona:

> *Hiilijalanjälki - tuotteen ja toiminnan aiheuttama ilmastokuorma Hiilijalanjälkilaskennassa selvitetään kuinka paljon kasvihuonekaasuja rakennusmateriaalien hankinnan ja rakentamisen aikana syntyy.*

Rakennustason laskenta toteutettiin rakennustuotteiden näkökulmasta elinkaaren tuote- ja kuljetusvaiheille A1 - A4 (EN 15978:2011)[3]. Erillisenä tarkasteluna otettiin mukaan rakentamisen muut elinkaaren vaiheet kuten rakentamisen vaihe A5 ja käyttövaiheen osat B2 (huolto), B4 (materiaalien vaihto) ja B6 (rakennuksen energiankulutus). Elinkaaren päätösvaihe C käsiteltiin tapauksessa, jossa puutuotteet käytöstä poiston jälkeen poltetaan ja näin ollen varastoitunut hiili palaa ilmakehän takaisiin.

Puun käytön substituutiovaikutus rakennustasolla laskettiin siten, että betonirakentamisen kasvihuonekaasupäästöistä vähennettiin puurakentamisen kasvihuonekaasupäästöt.

> *Substituutiovaikutus – kasvihuonepäästöjen erotus korvattaessa puulla muita materiaaleja tai energialähteitä.*

Rakennuskannan hiilivarasto selvitettiin ottamalla huomioon puun sisältämä hiili. Kuivassa puussa on noin puolet hiiltä. Hiilisisältö voidaan ilmoittaa hiilenä, mutta myös hiilidioksidina. Moolipainojen avulla voidaan puutuotteiden hiili laskea CO_2:seksi kaavalla $C + O_2 = CO_2$ (EN 16449)[4]. Näin saadaan, että kuivan tukkipuun hiilisisältö on 1,83 kg CO_2 per 1 kg puuta.

> *Hiilivarasto – puun kasvaessa sitoma hiili hiilidioksidina Metsästä korjatun puun hiili säilyy puutuotteissa. Puutuotteiden käytön päätyttyä puun polttaminen vapauttaa hiilen takaisin ilmakehään.*

Pitkäikäisissä tuotteissa hiilivarasto voidaan ottaa huomioon myös tase-arvona. Tässä tase lasketaan siten että tuotteen valmistuksen kasvihuonekaasupäästöistä vähennetään tuotteeseen varastoitunut hiilisisältö hiilidioksidiksi laskettuna. Toisaalta puutuotteiden rakennuskäytön jälkeinen hyödyntäminen energiana vapauttaa hiilen takaisin ympäristöön, joten rakennustason laskennassa hiilijalanjälki ja hiilivarasto on ilmoitettu erikseen.

---

[3] EN 15978:2011 Sustainability of construction works — Assessment of environmental performance of buildings — Calculation method.

[4] EN 16449 Round and sawn timber - Wood and wood-based products – Calculation of the biogenic carbon content of wood and conversion to carbon dioxide.

Taulukko 1 esittää puumateriaalien tilaavuuspainon, hiilisisällön (C -> CO_2) sekä hiilijalanjäljen (uusin tietolähde on CLT:n EPD, 2017, valmistajan parantanut tuotteen valmistuksen päästöjä).

Taulukko 1. Puutuotteiden tiheydet, hiilisisällöt ja hiilijalanjälki. (Hiilijalanjälki on laskettu elinkaaren vaiheille A1 – A4, sisältäen kuljetukset sekä hukan).

Puutuoteryhmä	Tiheys[5], kg/m^3	Hiilisisältö, (laskettuna CO_2:ksi) kg/kg	Hiilijalanjälki* CO_2e, kg/kg (elinkaaren vaihe A1-A4)	Lähde
Sahatavara	450	1,55	0,09	VTT Ilmari /Puuinfon EPD
Hirsi	450	1,55	0,12	VTT/Ilmari
Liimapuu	470	1,62	0,36	VTT/Ilmari
CLT	470	1,55	0,21	(Stora Enso EPD[6]) (hyväksytty 2017-06-01)
Lastulevy	630	1,06	0,61	VTT/Ilmari
Vaneri (kuusi)	460	1,64	0,28	MetsäWood, EPD[7]
Kuitulevy	300	1,53	0,46	VTT/Ilmari. Suomen kuitulevyn EPD (RT YS 28.1[8])

*sisältää keskimääräisen kuljetuksen käyttökohteeseen sekä hukan

[5] Kuivamassa per tilavuus käyttökosteudessa
[6] EPD, CLT by Stora Enso http://assets.storaenso.com/se/buildingandliving/Documents/EPD%20-%20CLT%20by%20Stora%20Enso%202017.pdf
[7] Environmental product declaration. Metsä Wood Spruce Plywood. Uncoated. Validity until January, 2019. http://www.metsawood.com/global/Tools/MaterialArchive/MaterialArchive/MetsaWood-Spruce-Environmental-declaration.pdf
[8] Leijonalevy, Suomen Kuitulevy Oy Pihlavan tehdas , RT YS 28.1 (Voimassa 17.4.2013 saakka).

2 Substituutiopotentiaali rakennustasolla uudisrakentamisessa

2.1 Johdanto

Tässä selvityksessä substituutiopotentiaalia arvioitiin rakennustasolla vertaamalla puurakenteisen asuinkerrostalon hiilijalanjälkeä vastaavaan betonielementtirakenteiseen rakennukseen.

Substituutio (erotus) lasketaan siten, että betonikerrostalon kasvihuonekaasupäästöistä vähennetään puukerrostalon kasvihuonekaasupäästöt.

Rakennustason laskelma käsittää viisi eri puurakennejärjestelmällä rakennettua puukerrostaloa (A-E) ja yhden betonielementtirakennuksen (F):

- puupilari-palkki-runko (A),
- CLT-rakenteiset suurelementit (B),
- puurankarakenteiset tilaelementit (C),
- puurankarakenteiset suurelementit (D),
- CLT-rakenteiset tilaelementit (E),
- betonielementtirakennus (F).

2.2 Lähtötiedot

2.2.1 Mallirakennus

Laskennan lähtökohtana on 4 kerroksinen asuintalo[9] (Kuva 2, Kuva 3 ja Taulukko 2Taulukko 1). Rakennuksen huonejako ja malli perustuvat Puuinfon mallikerrostaloon. Puurakennus-ratkaisussa mallikerrostalossa ensimmäinen kerros oli betonia; tässä peruslaskennassa on oletettu, että kaikki 4 kerrosta ovat puurakenteiset ja betonirakennuksessa vastaavasti kaikki neljä kerrosta ovat betonirakenteisia.

Perusratkaisussa rakennuksen julkisivussa on puupaneeli, rakennuksen alapohja on betonilaatta ja lämmityksenä käytetään vesikiertoista lattialämmitystä, jonka takia myös puukerrostalojen lattiassa on betonikerros. Rakennuksen huoneistojen väliset seinät ovat kantavia ja rakennuksissa käytetään 4-lasisia puu-alumiini ikkunoita.

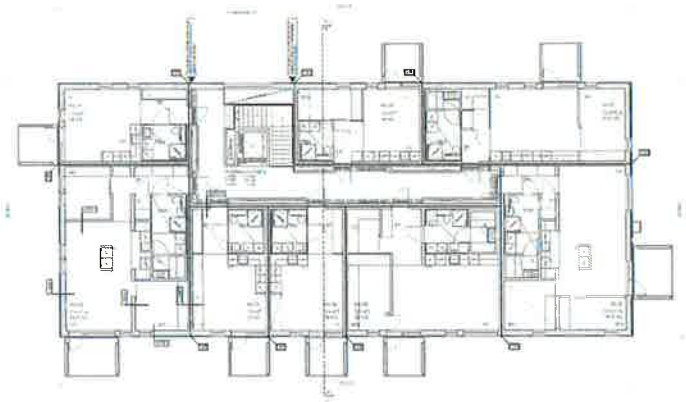
Kaikki rakennukset täyttävät samat keskeiset rakennusmääräykset (U-arvo < 0,17 W/m^{2}K, R'w > 55 dB. Puurakennuksien ulkoseinien sekä osastoivien seinien paloluokka on REI 60 (palokestoaika 60 minuuttia) ja suojaverhous täyttää $K_2$10/EI15 -vaatimukset. Nämä mitoittamalla saavutettavat ominaisuudet ovat P2-paloluokan asuinrakennuksen osalta riittävät, kun puukerroksia on 4. Betonirakennus, jossa ulkoseinän sisäkuori on kantava (150 mm), palonkestoaika on parempi; REI on 90 (90 minuuttia).

Kaikilla vertailtavilla rakennuksilla on sama tilaratkaisu. Tämän takia puukerrostalon seinärakenneratkaisujen kerrospaksuudet on valittu samoiksi. Tilaratkaisun takia myös betonirakenteiden tilavaraus on pyritty pitämään samana. Tätä varten betonirakennuksen

[9] Lähde: Puuinfo, Mallikerrostalo. http://www.puuinfo.fi/sites/default/files/content/rakentaminen/suunnitteluohjeet/runkopes-20/rakennuslupapiirustukset.pdf (haettu 7.7.2017)

alaa on pienennetty 2 %, johtuen puu- ja betonirakennuksissa käytettyjen seinäratkaisujen sisä- ja ulkoseinien kerrospaksuuksien eroista.

Kuva 2. Mallikerrostalo. Lähde: Puuinfo (arviossa kuitenkin myös ensimmäinen kerros on puurakenteinen vain herkkyystarkastelussa betonirakenteinen. Laskenta ei sisällä parvekkeiden päällä olevia katoksia).



Kuva 3. Mallikerrostalon pohjapiirustus. Lähde: Puuinfo.

Taulukko 2. Tarkasteltavan kerrostalon laajuustiedot.

Rakennustyyppi	Asuinkerrostalo
Kerrosten lukumäärä	4 krs
Bruttoala	1922 m^2
Huoneistoala	1402 m^2
Asuntojen lukumäärä	32 kpl

Taulukko 3. Kerrostalon rakennusosien määrät (Seinistä ja pohjista on vähennetty aukotukset).

Rakennusosa	Määrä
Ulkoseinät	1101 m^2
Kantavat huoneistojen väliset seinät	873 m^2
Ei kantavat väliseinät	495 m^2
Porras ja hissikuilun seinät	90 m^2
Alapohja	480 m^2
Välipohja	1395 m^2
Yläpohja	480 m^2
Vesikatto	533 m^2
Porraselementti (välitasanteella)	3 kpl (1 per kerros)
Ovet	281 m^2
Ikkunat	190 m^2
Parvekkeet	161 m^2
Parvekkeiden seinät	307 m^2
Alakatot	540 m^2
Perustus	Betoniperustus
Hormit	Kevytrakenteiset

2.2.2 Rakennejärjestelmät

Rakennuksen laskenta sisältää seuraavat päärakenteet: ulkoseinät, yläpohja, alapohja ja välipohjat, kattoristikot, vesikatteet, kevyet ja kantavat väliseinät, parvekkeet, portaat, ikkunat ja ovet, hissikuilu ja perustus.

Rakennusaikainen hukka ja kuljetus on otettu laskennoissa huomioon keskimääräisinä (kuljetus materiaalikuljetuksena, elementtien ja moduulien kuljetusta ei tutkittu). Rakennuksissa käytetyt päärakenteet ja ominaisuudet esitetään seuraavissa taulukoissa: Taulukko 4, Taulukko 5, Taulukko 6, Taulukko 7 ja Taulukko 8.

Rakenneratkaisun tase on laskettu siten että rakenteen hiilisisällöstä on vähennetty hiilijalanjälki (hiilisisältö on laskettu CO_2:sena).

Rakenteiden erityispiirteitä:

- Laskennan lähtökohtana olleiden puurakenneratkaisujen perustiedot perustuvat RunkoPes2[10] ohjerakenteisiin, paitsi 2 välipohjaratkaisua (C ja E), joitten vahvuutta on kasvatettu (jänneväli 7,5 m).
- Betonirakennusratkaisut perustuvat RT ohjetiedostoissa esitettyihin betonirakenneratkaisuihin

[10] RunkoPes 2.0 - http://www.puuinfo.fi/suunnitteluohjeet/runkopes-20 (haettu 7.7.2017)

- Puurakennejärjestelmien ulkoseinien kerrospaksuus on 365 mm, tämän mukaan seinän U-arvo on alle 0,17 W/m^{2}K. Betonielementin rakennekerroksen paksuus on 460 mm, josta kantava betoninen sisäkuori on 150 mm, ulkokuori 70mm ja villakerros 240mm.

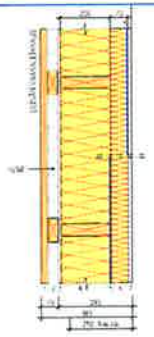
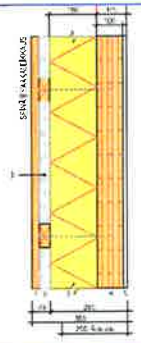
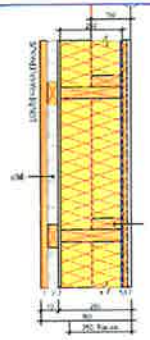
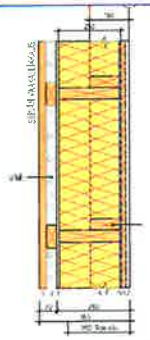
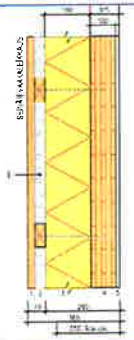
- Kantavien puuväliseinäratkaisujen kerrospaksuus on 280 mm. Betoniratkaisun kerrospaksuus RT ohjetiedoston mukaan voi olla 80...240mm. Tässä kerrospaksuudeksi on valittu 150 mm, jotta täyttyisi kantavuus ja ääneneristävyysvaatimus. Toisaalta rakennepaksuudella on vaikutusta myös rakenteen paloluokkaan; tämä on nyt korkeampi kuin puuratkaisulla (REI 90), mutta paloturvallisuutta puurakenteisissa kerrostaloissa parantaa vesi- tai sumusammutusjärjestelmä. Betonirakenteen pienempi kerrospaksuus on kompensoitu siten että asuntojen koot ja tilaratkaisu eivät muutu.

- Betonielementtikerrostalon seinärakenteiden eri paksuus on laskennallisesti otettu huomioon siten, että tilaratkaisu ja asuntojen koot pysyvät kaikissa vaihtoehdoissa samoina (tämän mukaan betonielementtirakennuksen ulkoseinä on 1 % pienempi ja alapohja sekä välipohjat ovat 2 % pienempiä kuin vastaavat puukerrostalon rakenteet).

- Kaikissa ratkaisuissa lattiapintana on käytetty parkettia. Lattialämmityksen takia kaikissa välipohjaratkaisuissa on myös betonikerros, johon on upotettu lämmitysputket (putket eivät sisälly laskentaan).

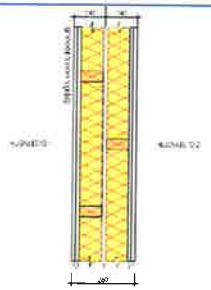
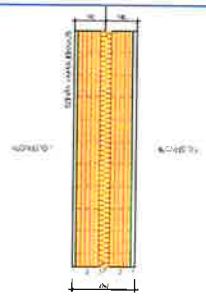
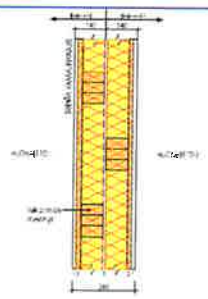
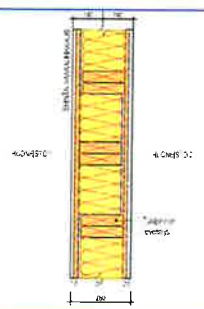
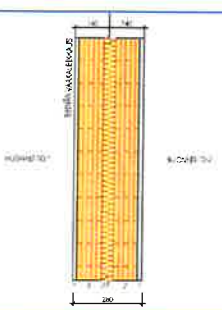
- Kattorakenteena kaikissa rakennusratkaisussa on käytetty naulalevyristikkoja. Vesikatteena on aluskatteellinen bitumikermi (2-kerroskate).

Taulukko 4. Ulkoseinäratkaisut (rakenteen lisäksi puurakenteet sisältävät myös ylä- ja alasidepuuliitokset) (Tase: hiilisisältö – hiilijalanjälki).

Ratkaisu	**A**	**B**	**C**	**D**	**E**	**F**
Tyyppi	Pilari-palkki runko	CLT -rakenteinen suurelementti	Rankarakenteinen tilaelementti	Rankarakenteinen suurelementti	CLT-rakenteinen tilaelementti	Betonielementti
Lähde	RunkoPes 2.0, US401ER (ei kantava rankarakenne)	RunkoPes 2.0, US401KM (kantava massiivipuu)	RunkoPes 2.0, US401KR (kantava rankarakenne)	RunkoPes 2.0, US401KR (kantava rankarakenne)	RunkoPes 2.0, US401KM (kantava massiivipuu)	RT 82-11006[11], US 405
Ominaisuus	REI 60 U-arvo < 0,17 W/m2K	REI 60, U-arvo < 0,17 W/m2K	REI 60, U-arvo < 0,17 W/m2K	REI 60, u-arvo < 0,17 W/m2K	REI 60, u-arvo < 0,17 W/m2K	REI 90, U-arvo = 0,16 W/m2K
Rakenne						
Paino, kg/m^2 (puutuote-%)	72 (60 %)	97 (76 %)	77 (63 %)	77 (63 %)	97 (76 %)	549 (0 %)
Hiilijalanjälki, kg CO2e/m^2	32	30	33	33	30	120
Hiilisisältö, kgCO2/m^2	66	115	78	78	115	0
Tase, kgCO_2/m^2	34	84	44	44	84	-120

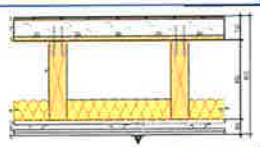
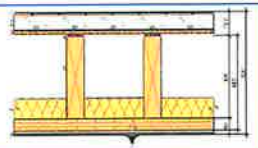
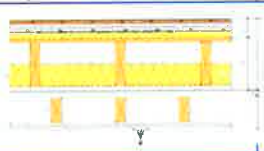
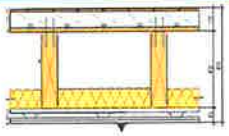
[11] RT 82-11006. 2010. Ulkoseinärakenteita. Ohjeet, lokakuu 2010, 32 sivua.

Taulukko 5. Huoneistojen kantavat väliseinäratkaisut (palo-osastoivat rakenneosat) (rakenteen lisäksi puurakenteet sisältävät myös ylä- ja alasidepuuliitokset) (Tase: hiilisisältö – hiilijalanjälki).

Ratkaisu	**A**	**B**	**C**	**D**	**E**	**F**
Tyyppi	Pilari-palkki runko	CLT -rakenteinen suurelementti	Rankarakenteinen tilaelementti	Rankarakenteinen suurelementti	CLT-rakenteinen tilaelementti	Betonielementti
Lähde	RunkoPes 2.0, HVS401ER (ei kantava rankarakenne)	RunkoPes 2.0, HVS401KM (kantava massiivipuu)	RunkoPes 2.0, THVS401KR (kantava rankarakenne)	RunkoPes 2.0, HVS401KR (kantava rankarakenne)	RunkoPes 2.0, THVS401KM, (kantava massiivipuu)	RT 82-10903[12], VS 401
Ominaisuus	REI 60	REI 60	REI 60, R'W > 55db	REI 60, R'W > 55db	REI 60	REI 90 R'w = 55db
Rakenne						
Paino, kg/m^2 (puutuote-%)	62 (19 %)	121 (81 %)	80 (63 %)	79 (62 %)	121 (83 %)	364 (0 %)
Hiilijalanjälki, kg CO_2e/m^2	34	32	37	37	32	73
Hiilisisältö, kgCO_2/m^2	18	152	83	81	152	0
Tase, kgCO_2/m^2	-16	119	45	44	120	-73

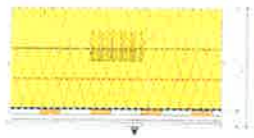
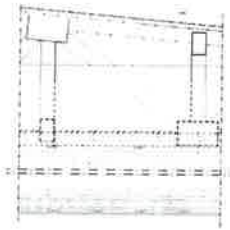
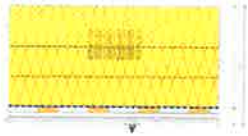
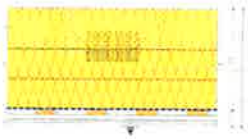
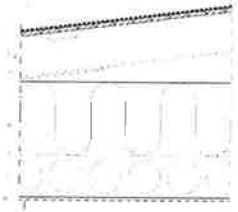
[12] RT 82-10903. Väliseinärakenteita. Ohjetiedosto, syyskuu 2007, 38 sivua.

Taulukko 6. Välipohjaratkaisut (Tase: hiilisisältö – hiilijalanjälki).

Ratkaisu	**A**	**B**	**C**	**D**	**E**	**F**
Tyyppi	Pilari-palkki runko	CLT -rakenteinen suurelementti	Rankarakenteinen tilaelementti	Rankarakenteinen suurelementti	CLT-rakenteinen tilaelementti	Betonielementti
Lähde	RunkoPes 2.0, VP802BRL	RunkoPes 2.0, VP802KRL	RunkoPes 2.0, TVP801R pohjalta, ratkaisua vahvennettu	RunkoPes 2.0, VP802BRL	RunkoPes 2.0, TVP801M pohjalta. Ratkaisua vahvennettiin	RT 83-10902[13] US 401, ontelolaatta
Ominaisuus	REI 60 R'w>55, L'n,w<53, Jänneväli L<7,5 m Suojaverhous EI30	REI 60 R'w>55, L'n,w<53, jänneväli L<7,5 m suojaverhous EI30	REI 60 R'w>55, L'n,w<53 Oletettu että täyttää vaatimukset >7,5m Suojaverhous EI30	REI 60 R'w>55, L'n,w<53, Jänneväli L<7,5 m Suojaverhous EI30	REI 60 R'w>55, L'n,w<53 Suojaverhous EI30 Oletettu että täyttää vaatimukset >7,5m	REI 60 R'w>55, L'n,w<53 Suojaverhous EI30
Rakenne						
Paino, kg/m^2 (puutuote-%)	282 (15 %)	285 (26 %)	175 (25 %)	282 (15 %)	269 (51 %)	555 (2 %)
Hiilijalanjälki, kg CO_2e/m^2	74	78	55	74	70	101
Hiilisisältö, kgCO_2/m^2	56	109	59	56	202	9
Tase, kgCO_2/m^2	-18	31	4	-18	131	-92

[13] RT 83-10902. Välipohjarakenteita. Ohjetiedosto, elokuu 2007, 36 sivua.

Taulukko 7. Yläpohjaratkaisut (Tase: hiilisisältö – hiilijalanjälki).

Ratkaisu	**A**	**B**	**C**	**D**	**E**	**F**
Tyyppi	Pilari-palkki runko	CLT -rakenteinen suurelementti	Rankarakenteinen tilaelementti	Rankarakenteinen suurelementti	CLT-rakenteinen tilaelementti	Betonielementti
Lähde	RunkoPes 2.0, YP801NR	HEKA Eskolantie, Talo A (rakennetyyppi YP1, KPM-Engineering)	RunkoPes 2.0, YP801NR	RunkoPes 2.0, YP801NR	Eskolantie	Kuninkaantammi, Helen
Ominaisuus	REI 60, U-arvo < 0,09 W/m2K, Suojaverhous EI30	REI 60, U-arvo < 0,07 W/m2K, Suojaverhous EI30	REI 60, U-arvo < 0,09 W/m2K, Suojaverhous EI30	REI 60, U-arvo < 0,09 W/m2K, Suojaverhous EI30	REI 60, U-arvo < 0,07 W/m2K, Suojaverhous EI30	REI 60, U-arvo < 0,09 W/m2K
Rakenne						
Paino, kg/m^2 (puutuote-%)	97 (46 %)	129 (73 %)	97 (46 %)	97 (46 %)	129 (61 %)	437 (9 %)
Hiilijalanjälki, kg CO_2e/m^2	61	53	61	61	53	127
Hiilisisältö, kgCO_2/m^2	73	129	73	73	129	62
Tase, kgCO_2/m^2	12	76	12	12	76	-66

Taulukko 8. Muut rakenneratkaisut (kevyt väliseinä, alapohja) (Tase: hiilisisältö – hiilijalanjälki).

Ratkaisu	**Kevyt välisenä**	**Alapohja**	**Alas laskettu katto**	**Portaat**	**Hormit ja hissikuilu**
Tyyppi	Puuranka puurakennuksissa ja teräsranka betonirakennuksessa	Betonirakenteinen alapohja	Kaikissa 2 rakennetyyppiä: puu- ja kipsilevyverhous	Puuportaat puurakennuksissa ja betoniportaat betonirakennus	Kaikissa rakennuksissa kevytrakenteiset hormit Kaikissa rakennuksissa betoninen hissikuilu
Lähde	RunkoPes 2.0, VS801ER, (ei kantava rankarakenne)	RT 83-11009, AP 417			
Ominaisuus		U-arvo = 0,16 W/m2K,			
Ratkaisu				Porraselementti 1200 mm, yksivartinen, välitasanteella	
Paino, (puutuote-%)	24 kg/m^2 (13 %) (puuranka) 22 (0 %) (teräsranka)	905 kg/m^2 (1 %)	10 kg/m^2 (99%) (puupaneli), 12 kg/m^2 (27 %) (kipsilevy verhous)	1161 kg/kerros (99 %) (puuporras), 3600 kg/kerros (0 %) (betoniporras)	Hormit: 5660 kg/rakennus (22 %) Hissikuilu: 40 500 kg/rakennus (0%)
Hiilijalanjälki	12 /14 kg CO2e/m^2 (puuranka / teräsranka)	89 kg CO2e/m^2	1 / 4 kg CO2e/m^2 (puupaneli / kipsilevy verhous)	260/ 729 kg CO2e/kerros (puu-/ betoniporras)	Hormit: 2735 kgCO_2e/rakennus, Hissikuilu: 7753 kgCO_2e/rakennus
Hiilisisältö	5 / 0 kg CO_2/m^2	9 kg CO_2/m^2	15 / 5 kg CO_2/m^2	1847 / 0 per kerros	Hormit: 1950 kg CO_2e/rakennus Hissikuilu: 0 kgCO_2e/rakennus
Tase	-7 / -14 kg CO_2/m^2	-80 kg CO_2/m^2	14 / 1 kg CO_2/m^2	1587 /-729 per kerros	Hormit: -789 kg/rakennus Hissikuilu: – 7753 kg/rakennus

2.2.3 Rakentaminen

Rakentamisaikainen energiankulutus perustuu LeanWood projektin selvitykseen (Taulukko 9)[14]. Tämän pohjalta rakentamisen hiilijalanjälki voidaan arvioida rakennustyypistä riippumattomasti ja on suuruusluokalta noin 14 kWh/rak-m^3.

Taulukko 9. Rakentamisen aikainen energiankulutus (energiankulutuksen luvut perustuvat Rakennusliike Reponen Oy:n rakentamien kohteiden työmaanaikaisiin energialaskuihin).

Rakennuksen tyyppi	Kohteen koko	Sähkö	Kauko-lämpö	Polttoöljy	Yhteensä
	m^3	kWh/m^3	kWh/m^3	kWh/m^3	kWh/m^3
Bet-1	6 400	12	0	5,3	17
Bet-2	37 410	7	5,2	2,0	14
Bet-3	5 570	9	0	3,2	12
Bet-4	28 340	11	2,4	0	14
Betonirakennus keskiarvo					14,4
Puu-1	4 687	14	0	0	14
Puu-A	59 986	8	6,6	1,2	16
Puu-2	30 045	7	3,2	0	10
Puurakennus keskiarvo					13,7

2.2.4 Rakennuksen käyttö

Rakennuksen käyttö on laskettu 50 vuoden käyttöajalle:

- Puurakennusten käytönaikainen hoito sisältää julkisivujen hoitomaalauksen. Käyttöajan aikana maalataan julkisivuja 2 kertaa. Betonijulkisivujen osalta on oletettu, että saumojen uusimisia eikä muita huoltoja tarvita.
- Käyttöajan aikana rakennuksien ikkunat vaihdetaan kerran.

Rakennusten käytönaikaisen energiankulutuksen täytyy täyttää E-lukuvaatimukset. Rakennusmääräysten mukaan uudisrakennetulle kerrostalolle E-luku ei saa ylittää arvoa 130 kWh_E/m^2. Kaikki tässä tarkasteltavat rakennukset täyttävät nykyiset energiamääräykset ja ovat hyvin energiatehokkaita. Laskenta ei ota kantaa millä tekniikoilla tähän energiatehokkaaseen rakentamiseen päätytään. Vuotuinen sähkön, lämmön ja käyttöveden kulutus on oletettu olevan alle 100 kWh/m^2 (sähkö 45 kWh/m^2, lämmitys 35 kWh/m^2 ja käyttövesi 20 kWh/m^2) ja näin ollen E-luku vaatimus on täytetty (E-luku 115 kWh_E/m^2 < 130 kWh_E/m^2).

Suomen energiateollisuuden mukaan alhaisin sähkötuotannon CO_2 päästö oli vuonna 2015 (0,097 kg/kWh)[15]. Vuonna 2016 sähkötuotannon päästö oli 0,105 kg CO_2/kWh. Tässä

[14] Nykänen, E., Häkkinen, T., Kiviniemi, A., Lahdenperä, P., Pulakka, S., Ruuska, A., Saari, M., Vares, S., Cronhjort, Y., Heikkinen, P., Tulamo, T., Tidwell, P. 2017. Puurakentaminen Euroopassa. LeanWood. VTT Technology 297. ISBN 978-951-38-8534-2 (URL: http://www.vtt.fi/julkaisut)

[15] Enegiateollisuus. Sähkötilasto 2016. https://energia.fi/ajankohtaista_ja_materiaalipankki/tilastot/sahkotilastot (26.8.2017)

laskennassa käytettiin ostosähkölle hiilijalanjälki arvoa 0,116 kg CO_2/kWh (sisältää jakelu ja siirtohäviöt).

Myös Suomen kaukolämpöteollisuus on vähentänyt runsaasti tuotannon yksikköpäästöjä (Energiateollisuus. Kaukolämpötilasto). Kun vuonna 2005 keskimääräinen Suomen kaukolämpötuotannon päästö oli 0,200 kg CO_2/kWh, niin vuonna 2015 tämä oli vain 0,150 kg CO_2/kWh. Vuonna 2016 kaukolämpötuotannon päästö kuitenkin kasvoi, ja oli 0,163 kg/kWh[16]. Myös kaukolämmön jakelussa tapahtuu siirtohäviöitä. Tässä laskennassa kerrostaloon toimitetun lämmön hiilijalanjälki-arvona on käytetty arvoa 0,168 kg CO_2e/kWh. Toisaalta, kaukolämpö on tuotettu useassa kunnassa biopohjaisilla polttoaineilla ja näin ollen valmistuksen fossiiliset hiilipäästöt ovat lähellä 0 g/kWh. Herkkyystarkastelussa on oletettu, että sähkön ja lämmöntuotannon päästöt putoavat puoleen tai sähkö ja lämpö on tuotettu kokonaan uusiutuvilla energialähteillä.

2.3 Laskentatulokset

Laskennan perusoletuksena on, että puukerrostalon kaikki kerrokset rakennetaan puurunkoisina ja betonikerrostalossa kaikki betonirunkoisena. Betonikerrostalossa on kuitenkin samanlainen ristikkorakenteinen katto kuin puukerrostaloissa. Lisäksi betonikerrostalossa hormirakenteet on toteutettu myös kevytrakenteisina (samaa kuin puukerrostalossa). Kaikissa rakennuksissa lattiapäällystyksenä on käytetty parkettia.

2.3.1 Kerrostalojen rakennusmateriaalien tarve, materiaalien hiilijalanjälki ja hiilisisältö (A1-A4)

Kerrostalojen rakennusmateriaalien käyttötarve, puupohjaisten materiaalien käyttötarve sekä puupohjaisten materiaalien osuus koko rakenteesta ja rakennuksesta on esitetty taulukoissa Taulukko 10, Taulukko 11 ja Taulukko 12.

Taulukko 13 esittää puukerrostalorakennuksien (A-E) ja betonielementtikerrostalon (F) hiilijalanjäljen (kg CO_2e) ja Taulukko 14 hiilisisällön (kg CO_2) rakennetyypeittäin, elinkaaren vaiheille A1-A4 (hiilisisältö perustuu EN 16485 , kohta 6.3.4.2, kestävästi hoidetut metsät).

[16] Energiateollisuus. Kaukolämpötilasto. 2016.
https://energia.fi/ajankohtaista_ja_materiaalipankki/tilastot/kaukolampotilastot (26.8.2017)

Taulukko 10. Kerrostalorakenteiden materiaalitarve (tonneja) rakennetyypeissä ja rakennuksissa (Puukerrostalot A – E rakennejärjestelmillä ja F betonikerrostalo).

Rakennus	A	B	C	D	E	F
Rakennusmateriaalien tarve						
US, t	85	112	89	89	112	599
Kevyt VS, t	13	13	13	13	13	13
Kantava HVS, t	57	109	74	73	109	327
VP, t	419	422	262	419	395	776
AP, t	448	448	448	448	448	439
YP*, t	50	66	50	50	66	208
Perustus, t	165	165	165	165	165	184
Parvekkeet, t	31	31	31	31	31	177
Ovet ja ikkunat, t	25	25	25	25	25	25
Muut **, t	62	52	52	52	52	60
Yhteensä, t	1 355	1 444	1 210	1 365	1 417	2 808
Yhteensä, kg / br-m^2	705	751	630	710	737	1 461

* YP =yläpohjan lisäksi ristikot, vesikate, räystäs
** Muut = Kevytrakenteiset hormit, portaat, betoninen hissikuilu, A rakennuksen pilarit ja palkit.

Taulukko 11. Kerrostalorakenteiden puumateriaalien tarve (tonneja) rakennetyypeissä ja rakennuksissa (Puukerrostalot A – E rakennejärjestelmillä ja F betonikerrostalo).

Rakennus	A	B	C	D	E	F
Puumateriaalien tarve						
US, t	51	86	57	57	86	0
Kevyt VS, t	4	4	4	4	4	4
Kantava HVS, t	11	88	47	46	88	0
VP, t	65	113	68	65	199	22
AP, t	7	7	7	7	7	6
YP*, t	24	42	24	24	42	20
Perustus, t	0	0	0	0	0	0
Parvekkeet, t	25	25	25	25	25	2
Ovet ja ikkunat, t	4	4	4	4	4	4
Muut **, t	15	5	5	5	5	1
Yhteensä, t	204	373	240	236	459	60
Yhteensä, kg / br-m^2	106	194	125	123	239	31

* YP =yläpohjan lisäksi ristikot, vesikate, räystäs
** Muut = Kevytrakenteiset hormit, portaat, betoninen hissikuilu, A rakennuksen pilarit ja palkit.

Taulukko 12. Puumateriaalien osuus rakennetyypeittäin ja koko kerrostalon materiaalitarpeesta (Puukerrostalot A – E rakennejärjestelmillä ja F betonikerrostalo).

Rakennus	A	B	C	D	E	F
US	60 %	76 %	64 %	64 %	76 %	0 %
Kevyt VS	27 %	27 %	27 %	27 %	27 %	27 %
Kantava HVS	19 %	81 %	64 %	63 %	81 %	0 %
VP	15 %	27 %	26 %	15 %	50 %	3 %
AP	1 %	1 %	1 %	1 %	1 %	1 %
YP*	48 %	63 %	48 %	48 %	63 %	9 %
Perustus	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %
Parvekkeet	80 %	80 %	80 %	80 %	80 %	1 %
Ovet ja ikkunat	18 %	18 %	18 %	18 %	18 %	18 %
Muut **	24 %	10 %	10 %	10 %	10 %	2 %
Puumat. osuus materiaaleista	15 %	26 %	20 %	17 %	32 %	2 %

* YP =yläpohjan lisäksi ristikot, vesikate, räystäs
** Muut = Kevytrakenteiset hormit, portaat, betoninen hissikuilu, A rakennuksen pilarit ja palkit.

Taulukko 13. Kerrostaloissa käytettyjen materiaalien hiilijalanjälki (tCO_2e/rakennustyyppi, rakennus ja bruttoalaa sekä säästetyt materiaalipohjaiset päästöt absoluuttisina arvoina ja % (hiilijalanjäljen abs säästö laskettu: betonikerrostalo-puu) (Puukerrostalot A – E rakennejärjestelmillä ja F betonikerrostalo).

Rakennus	A	B	C	D	E	F
Hiilijalanjälki						
US, tCO_2e	35	34	37	37	34	131
Kevyt VS, tCO_2e	8	8	8	8	8	8
Kantava HVS, tCO_2e	29	28	33	32	28	64
VP, tCO_2e	104	110	79	104	99	140
AP, tCO_2e	43	43	43	43	43	42
YP*, tCO_2e	29	26	29	29	26	60
Perustus, tCO_2e	32	32	32	32	32	36
Parvekkeet, tCO_2e	11	11	11	11	11	31
Ovet ja ikkunat, tCO_2e	17	17	17	17	17	17
Muut **, tCO_2e	15	11	11	11	11	13
Yhteensä, t CO_2e	325	321	301	326	310	542
kg CO_2e / br-m^2	169	167	156	170	161	282
abs. säästö, t	217	220	241	216	231	0
säästö, %	40 %	41 %	44 %	40 %	43 %	0 %

* YP =yläpohjan lisäksi ristikot, vesikate, räystäs
** Muut = Kevytrakenteiset hormit, portaat, betoninen hissikuilu, A rakennuksen pilarit ja palkit.

Taulukko 14. Puukerrostalomateriaalien (A – E) hiilisisältö, laskettuna C -> CO_2:ksi (tCO_2 / rakennustyyppi ja rakennus), hiilivaraston kasvu absoluuttisena arvona ja %:na betonielementtikerrostalon (F) nähden.

Rakennus/ rakennus-osa	A	B	C	D	E	F
Hiilisisältö						
US, tCO_2	73	127	85	85	28	0
Kevyt VS, tCO_2	5	5	5	5	5	3
Kantava HVS, tCO_2	16	133	72	70	133	0
VP, tCO_2	83	156	87	83	286	17
AP, tCO_2	4	4	4	4	4	4
YP*, tCO_2	37	64	37	37	64	31
Perustus, tCO_2	0	0	0	0	0	0
Parvekkeet, tCO_2	33	33	33	33	33	6
Ovet ja ikkunat, tCO_2	13	13	13	13	13	13
Muut **, tCO_2	23	7	7	7	7	2
Yhteensä, t CO_2	287	543	345	338	574	77
kg CO_2 / br-m^2	149	283	179	176	298	40
Hiilivaraston kasvu, t CO_2	210	466	268	262	497	0
Hiilivaraston kasvu, %	174 %	508 %	249 %	241 %	547 %	0 %

* YP =yläpohjan lisäksi ristikot, vesikate, räystäs
** Muut = Kevytrakenteiset hormit, portaat, betoninen hissikuilu, A rakennuksen pilarit ja palkit.

2.3.2 Kerrostalojen 50 vuoden käyttö

Kerrostalojen 50 vuoden käyttö laskettiin elinkaaren tuotevaiheille, rakentamisen vaiheelle ja käyttövaiheelle (vaiheet A1 – A4, A5, B2 ja B4 sekä B6). Käytönaikainen energiankulutus laskettiin tapauksille jossa energiantuotanto ja päästöt vastaavat Suomessa 2016 valmistettua sähkön- ja lämmöntuotantoa (Taulukko 15). Vertailuna esitettään tapaukset, joissa lämmöntuotannon päästöt ovat puolet nykyisestä ja tapaus jossa kaikki lämpö ja sähkö ovat tuotettua uusiutuvilla energialähteillä (Taulukko 16, Taulukko 17). Lisäksi laskettiin kerrostalojen tuotteisiin sitoutunut hiili hiilivarastona 50 vuoden käyttöiän ajaksi (Taulukko 18).

Taulukko 15. 4-kerroksisen puukerrostalon (A-E) rakentamisen hiilijalanjälki ja säästöt betonirakennuksen (F) nähden. Laskenta sisältää tuotevaiheen (A1-A3), kuljetuksen (A4), rakentamisen (A5), rakennuksen käyttövaiheen aikaisen kunnossapidon (B2), materiaalien vaihdon (B4) ja rakennuksen energiankulutuksen 50 vuoden aikana (B6). Energiankulutuksen päästöt vastaavat keskimääräisiä päästöjä Suomessa vuonna 2016.

	A1-A4, t CO_2e	A5, t CO_2e	B2+B4, t CO_2e	B6, t CO_2e	Elinkaari-vaiheet yhteensä, t CO_2e	Säästö, (Betoni – puu) t CO_2e	Säästö, %
A	325	12	20	1 387	1 743	206	11 %
B	321	12	20	1 387	1 740	209	11 %
C	301	12	20	1 387	1 719	230	12 %
D	326	12	20	1 387	1 744	205	11 %
E	310	12	20	1 387	1 729	220	11 %
F	542	12	8,7	1 387	1 949	0	0 %

Taulukko 16. 4-kerroksisen puukerrostalon (A-E) rakentamisen kasvihuonekaasupäästöt ja säästöt betonirakennuksen (F) nähden. Energiankulutuksen päästöt ovat puolittuneet vuoden 2016 tuotannon nähden. Laskenta sisältää tuotevaiheen (A1-A3 ja kuljetuksen A4), rakentamisen (A5), rakennuksen käyttövaiheen aikaisen kunnossapidon (B2), materiaalien vaihdon (B4) ja rakennuksen energiankulutuksen 50 vuoden aikana (B6).

	A1-A4, t CO_2e	A5, t CO_2e	B2+B4, t CO_2e	B6, t CO_2e	Elinkaari-vaiheet yhteensä, t CO_2e	Säästö, (Betoni – puu) t CO_2e	Säästö, %
A	325	12	20	693	1 050	206	16 %
B	321	12	20	693	1 046	209	17 %
C	301	12	20	693	1 026	230	18 %
D	326	12	20	693	1 051	205	16 %
E	310	12	20	693	1 035	220	18 %
F	542	12	8,7	693	1 255	0	0 %

Taulukko 17. 4-kerroksisen puukerrostalon (A-E) rakentamisen kasvihuonekaasupäästöt ja säästöt betonirakennuksen (F) nähden. Rakennuksen 50 v. käyttövaiheen energia on tuotettu kaikki uusiutuvilla lähteillä. Laskenta sisältää tuotevaiheen (A1-A3 ja kuljetuksen A4), rakentamisen (A5), rakennuksen käyttövaiheen aikaisen kunnossapidon (B2), materiaalien vaihdon (B4) ja rakennuksen energiankulutuksen 50 vuoden aikana (B6).

	A1-A4, t CO_2e	A5, t CO_2e	B2+B4, t CO_2e	B6, t CO_2e	Elinkaari-vaiheet yhteensä, t CO_2e	Säästö, (Betoni – puu) t CO_2e	Säästö, %
A	325	12	20	0	356	206	37 %
B	321	12	20	0	353	209	37 %
C	301	12	20	0	332	230	41 %
D	326	12	20	0	357	205	36 %
E	310	12	20	0	342	220	39 %
F	542	12	8,7	0	562	0	0 %

Taulukko 18. 4-kerroksisen puukerrostalon (A-E) rakentamisen hiilisisältö ja hiilivaraston kasvu betonirakennuksen (F) nähden. Laskenta sisältää tuotevaiheen (A1-A3 ja kuljetuksen A4), rakentamisen (A5), rakennuksen käyttövaiheen aikaisen kunnossapidon (B2), materiaalien vaihdon (B4) ja rakennuksen energiankulutuksen 50 vuoden aikana (B6).

	A1-A4, hiili-sisältö, t CO_2e	A5, hiili-sisältö, t CO_2e	B2+B4, hiili-sisältö, t /CO_2e	B6, hiili-sisältö, t CO_2e	Elinkaari-vaiheet yhteensä, hiilisisältö, t CO_2e	C-varaston kasvu, (Betoni – puu) t CO_2e	C-varaston kasvu, %
A	287	0	0	0	287	210	174 %
B	543	0	0	0	543	466	508 %
C	345	0	0	0	345	268	249 %
D	338	0	0	0	338	262	241 %
E	574	0	0	0	574	497	547 %
F	77	0	0	0	77	0	0 %

2.3.3 Kerrostalojen elinkaaren päätösvaihe (C3)

EN 15978 mukaan puutuotteiden hiilisisältö ilmoitetaan elinkaarivaiheessa A1-A3, kun puutavara on hankittu kestävistä metsistä. Tämä hiilisisältö on puutuotteissa varastona koko sen elinkaaren aikana. Elinkaaren päätösvaiheessa rakennukset puretaan. Puutavaran käsittely ja mahdollinen polttoprosessi vapauttavat hiilisisällön takaisin päästönä ilmastoon.

Jos puutuotemateriaali voidaan kierrättää, hiilisisältö siirtyy varastona seuraavaan tuotejärjestelmään (EN 16485:2014).

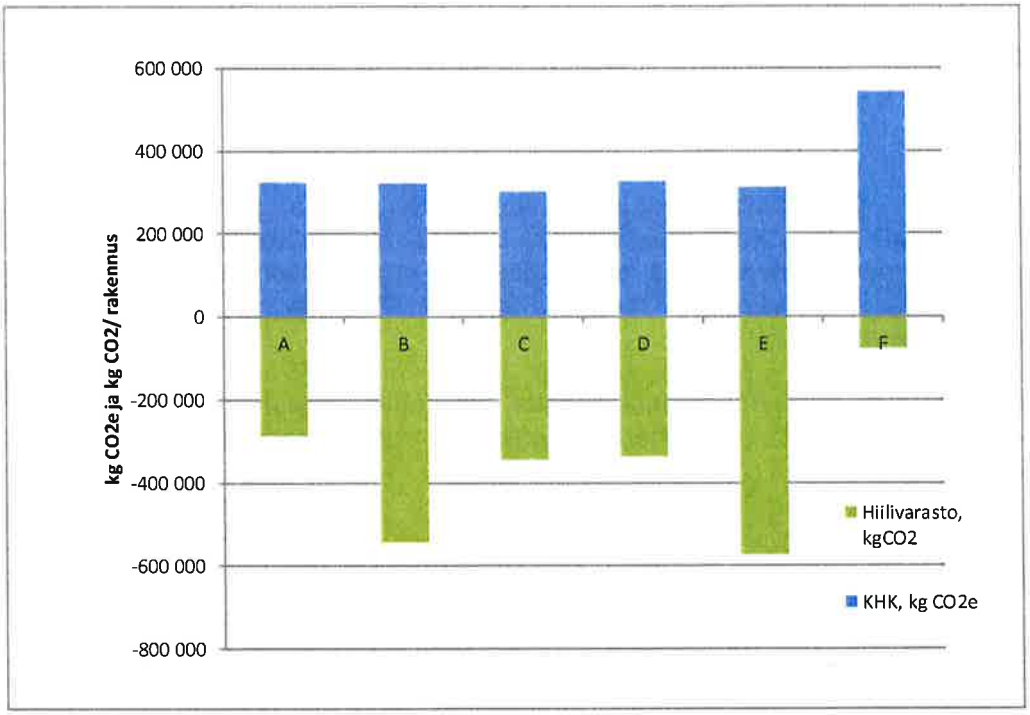
2.4 Johtopäätökset

Puukerrostalon kasvihuonekaasupäästöt arvioitiin viiden puukerrostalon rakennejärjestelmän osalta: pilari-palkki runko (A), CLT -rakenteinen suurelementti (B), rankarakenteinen tilaelementti (C), rankarakenteinen suurelementti (D) ja CLT-rakenteinen tilaelementti (E).

Ulkoseinärakenteiden hiilijalanjälki ero eri puurakennejärjestelmän osalta on noin 3 tonnia (Taulukko 13). Ratkaisujen välinen ero selittyy käytettyjen materiaalien jakaumalla. Esimerkiksi rankarakenteisen ratkaisun (A) ulkoseinämateriaalien käyttömäärä (kokonaispaino) on pienempi mutta hiilijalanjälki suurempi kuin CLT suurelementin (B) tapauksessa. Ratkaisussa A (rankarakenteinen ulkoseinä) muiden kuin puumateriaalien paino-osuus oli 40 %. Nämä aiheuttivat yli 80 % kasvihuonekaasupäästöistä. Rakenteessa käytettiin tuulensuojakipsilevyä ja palosuojakipsilevyä, kun CLT-rakenteisessa ulkoseinässä tarvittiin vain yhtä kipsilevykerrosta palosuojaukseen. Näin ollen ratkaisussa B muiden kuin puumateriaalien paino-osuus oli vain 23 %, jotka aiheuttivat 59 % päästöistä.

Puukerrostalojen osalta eniten materiaaliresursseja käytettiin CLT rakenteisissa rakennuksissa (B ja E), jossa oli puupohjaisia materiaaleja vastaavasti 26 % ja 32 %.

Tuloksen mukaan tuotevaiheen kasvihuonekaasupäästöt puukerrostalomateriaalien osalta olivat 156...170 kgCO_2e/br-m^2. Betonikerrostalon kasvihuonekaasujen määrä oli 282 kg CO_2e/br-m^2. Puukerrostalojen hiilisisältö laskettuna CO_2:sena oli 149...298 kg CO_2/brm^2. Hiilipäästöjen ja hiilisisällön tasetta esittää Kuva 4. Siinä puukerrostalojen (A – E) ja betonikerrostalon (F) hiilijalanjälki on esitetty CO_2e päästöinä ja hiilivarasto esitetty myös CO_2 päästönä, mutta miinusmerkkisenä (laskettuna, kg CO_2). Kuvasta nähdään, että eri puurakennejärjestelmien KHK-päästöt ovat samaa suurusluokkaa, mutta hiilivarastossa näkyy isojakin eroja. Puutuotteiden hiilivarastojen iso ero johtuu puutuotteiden käyttömääristä rakennuksissa. Silloin kun puurakennejärjestelmänä on käytössä CLT rakenteiset suurelementit (massiivipuurakenne rakennuksessa B) ja CLT-rakenteiset tilaelementit (massiivipuurakenne rakennuksessa E), puun käyttömäärät ovat korkeammat kuin muissa ratkaisuissa ja tämä näkyy myös isompana hiilivarasto-arvona, sen sijaan hiilijalanjälkeen tällä on vähäisempi merkitys (CLT valmistajan hiilipäästöt ovat suhteellisen pieniä esimerkiksi liimapuun valmistuksen nähden).



Kuva 4. Puukerrostalojen (A-E) ja betonielementtikerrostalon (F) materiaalien hiilijalanjälki (KHK, kg CO2e) ja hiilisisältö (hiilivarastona, kg CO_2) (hiili on varastoitunut tuotteisiin koko käyttöiän ajaksi. Elinkaaren päätösvaiheessa tuotteiden hyödyntäminen lämmöntuotannossa vapauttaa yhtä paljon päästöjä ympäristöön, kun oli elinkaaren aikana varastoitunut ja näin ollen hiilivarasto nollautuu).

Rakentamalla puurakenteinen 4-kerroksinen asuinkerrostalo voidaan säästää materiaalipohjaisia kasvihuonekaasupäästöjä 40 – 44 % verrattuna betonirakenteisen kerrostaloon (betonielementti) ja samalla kasvattaa hiilivarastoa noin 174 – 547 % (perusratkaisu).

Laskenta tehtiin rakennuksien tuotevaiheen (A1-A4) lisäksi myös rakennusvaiheelle (A5) sekä rakennuksen käyttövaiheelle (B2, B4, B6). Arviossa käyttövaiheena käytettiin 50 vuotta.

Silloin kuin rakennuksen käyttövaihe otetaan laskentaan mukaan, dominoivaksi hiilijalanjäljen suhteen muodostuu energian kulutus rakennuksessa ja energian tuotannon päästöt. Puurakentamisen aiheuttama kasvihuonekaasujen säästö (erotus) 50 vuoden elinkaarelle laskettuna on 11 – 12 % (Taulukko 15), jos energiateollisuus ei paranna keskimääräisiä energian tuotannon päästöjä. Tämä ei kuitenkaan ole todennäköistä, koska energiateollisuus on sitoutunut vähentämään päästöjä ennestään. Sitä varten laskenta tehtiin tapauksille, joissa energiantuotannon päästöt ovat puolittuneet vuoden 2016 tasosta tai fossiilista alkuperä olevia päästöjä ei ole uusiutuvien lähteiden ansiosta. Energiapäästöjen puolittumisen tapauksessa puukerrostalojen kasvihuonekaasujen säästö (erotus) betonielementtirakennukseen nähden on noin 16 - 18 % (Taulukko 16) ja kokonaan uusiutuvan energiamuodon tapauksessa 37 – 41 % (Taulukko 17).

Rakennuksien hiilivarasto riippuu rakenneratkaisuissa käytettyjen puumateriaalien määristä. Rakentamalla puukerrostaloja voidaan kasvattaa rakentamisen hiilivarastoa 174 - 547 %. Eniten hiilivarasto kasvaa (noin 547 %), kun rakennusmateriaalina on käytetty massiivirakenteisia ristiin liimattuja puulevyjä (CLT) ja järjestelmänä on käytössä rakentaminen tilaelementeistä. Hiilivarasto pysyy puutuotteissa koko käyttöiän aikana. Elinkaaren päätösvaiheessa puutuotteisiin varastoitunut hiili vapautuu ympäristöön takaisiin, jos käytöstä poistetut puutuotteet hyödynnetään lämmöntuotannossa. Tapauksessa, jossa käytöstä poistetut puutuotteet siirtyvät seuraavaan käyttökohteeseen, hiilisisältö pysyy hiilivarastona (EN 16485:2014).

3 Substituutiopotentiaali rakennustasolla korjausrakentamisessa

3.1 Johdanto

Puurakentamisen substituutiovaikutusta arvioitiin tyypillisen betonielementtirakenteisen asuinrakennuksen peruskorjauksessa sekä täydennysrakentamisen tapauksessa. Korjausrakentamisen menetelmänä tässä käytettiin lisälämmöneristystä puurakenteisella TES- elementillä (Tes Energy facade, 2009)[17]. Tulosta verrattiin betonielementin lämpörappausmenetelmällä.

Substituutiovaikutus lisäkerrosrakentamisessa selvitettiin tapauksille, jossa 4-kerroksisen betonielementtitalon katolle rakennetaan lisäkerros rankarakenteisena tilaelementtinä tai betonielementeistä.

3.2 Lähtötiedot

Korjaus TES menetelmällä

TES menetelmässä julkisivujen betonielementin uloin kerros poistetaan ja tilalle asennetaan puurakenteinen esivalmistettu elementti. Tässä on kuitenkin oletettu, että kyseessä on säästävä korjausrakentaminen ja näin ollen elementti asennetaan suoraan alla olevan betonielementin päälle.

Kantava puurakenteena elementin reunoilla ja ikkunoiden ympärillä on oletettu käytettävän 39 x 300 mm kertopuuta. Kertopuurungon sisäpuolelle on kiinnitetty 9 mm kuusivaneri. Elementin ulkopinnassa on kuitusementtilevy (tuulensuoja), johon on liimattu mineraali-pohjainen rappausaluslamelli.

TES-korjausmenetelmää verrataan lämpörappaus menetelmään. Lämpörappaus-menetelmässä oletettiin, että vanhan betonielementin päälle tehdään lisäeristys ja rappaus. Molemmissa korjausrakentamisen menetelmässä myös ikkunat uusitaan. Rakennuksena käytetään mallikerrostaloa, jonka ulkoseinän ala on 1354 m^2 (ilman aukotuksia).

Lisäkerrosrakentaminen

Puun substituutiovaikutus lisäkerrosrakentamisessa arvioitiin edellä esitettyjen betonikerrostalon sekä rankarakenteisen tilaelementtisen puukerrostalon laskennan pohjalta.

[17] Anon. Tes Energy fasade. 2009. Loppuraportti.
http://www.puuinfo.fi/sites/default/files/content/tiedotteet/schweighofer-preis-2011-innovaatiopalkinto-puurakentamisen-tutkimushankkeelle/tkk-tes-energy-facade-loppuraportti.pdf

3.3 Tulokset

Taulukko 19 ja Taulukko 20 esittävät korjausrakentamisen hiilijalanjäljen sekä hiilisisällön betonisen elementtikerrostalon korjauksessa TES-elementillä ja lämpörappauksena. Taulukko 21 esittää tulokset lisäkerrosrakentamisen osalta.

Taulukko 19. Korjausrakentamisen hiilijalanjälki ja kasvihuonekaasujen säästö vertailuna TES elementti ja lämpörappaus (esimerkkinä on 4 kerroksisen mallikerrostalon ulkoseinän korjaus, jossa myös ikkunat vaihdetaan).

Korjaus-rakentamisen ratkaisu	rakenne t CO_2e	ikkunat, t CO_2e	Yhteensä t CO_2e	KHK säästö t, (lämpörappaus - TES)	KHK-päästöjen säästö, %
TES elementti	38	9	47	-19	-67 %
Lämpörappaus	19	9	28	0	0 %

Taulukko 20. Korjausrakentaminen hiilivaraston kasvu. TES elementti ja lämpörappaus. Esimerkkinä 4 kerroksisen mallikerrostalon ulkoseinä, jossa myös ikkunat vaihdetaan.

Korjaus-rakentamisen ratkaisu	Rakenne, hiilisisältö, t CO_2	ikkunat, hiilisisältö, t CO_2	Yhteensä	Hiilivaraston kasvu t, (TES - lämpö-rappaus)	Hiilivaraston kasvu, %
TES elementti	50	5,5	55,5	50	817 %
Lämpörappaus	0	5,5	5,5	0	

Taulukko 21. Lisäkerrosrakentamisen hiilijalanjälki suurelementtirakenteisena ja betonielementtirakenteisena. Lisäkerros rakennetaan 4-kerroksesen mallikerrostalon katolle.

Lisäkerrosrakentamisen ratkaisu	Hiilijalanjälki, t CO_2e	Hiilisisältö, t CO_2	KHK-päästöjen säästö, %	Hiilivaraston kasvu, %
Rankarakenteinen suurelementti	76	97	36 %	348%
Betoni-elementti	119	18	0 %	0 %

3.4 Johtopäätökset

TES-elementin valmistus ja käyttö korjausrakentamisessa aiheuttaa enemmän valmistuksen aikaisia kasvihuonekaasupäästöjä kuin lämpörappaus. Molemmissa korjausmenetelmissä oletuksena oli myös ikkunoiden uusiminen. TES-korjausmenetelmässä kasvihuonekaasu-päästöjä ei säästetty, mutta korjausrakentaminen käyttämällä TES-elementtiä kasvattaa hiilivarastoa yli 800 % lämpörappauksen nähden (lämpörappaus ja ikkunoiden uusiminen).

Lisäkerrosrakentamisessa kasvihuonekaasujen päästöjen säästö (erotus) betonielementtirakentamisen nähden on 36 % ja hiilivaraston kasvu 348 %.

4 Hiilivarasto rakennuskannan tasolla

4.1 Johdanto

Puiset rakennukset ja rakenteet sitovat itseensä hiiltä. Rakenteisiin varastoitunut hiilidioksidi vapautuu takaisin ilmakehään rakennuksen purkamisen yhteydessä. Yksittäisen rakenteen uusimisen yhteydessä hiilisisältö pysyy ennallaan, mikäli vanha puurakenne korvataan uudella puurakenteella.

Tämän projektin yhtenä tehtävänä oli laskea nykyisen rakennetun ympäristön sitoman hiilen määrä. Tutkimusmenetelmä ja tietolähteet ovat samat, kuin aiemmissa hiilivaraston arvioinneissa (Pingoud & Perälä, 2000; Pingoud, Perälä, Soimakallio & Pussinen, 2003). Arviointi on kolmevaiheinen: 1) talonrakennuskannan laajuus ja puisten rakennusosien määrä tarkasteluajankohtana; 2) muut puurakenteet tarkasteluajankohtana; ja 3) puisten rakennusosien hiilijalanjälki ja hiilisisältö. Tarkasteluajankohta on joulukuu 2016.

4.1.1 Talonrakennuskannan laajuus ja puisten rakennusosien määrä

Talonrakennuskannan laajuuden määrittämisessä lähtökohtana oli Tilastokeskuksen rakennuskantatilasto 'Rakennukset ja kesämökit'. Rakennuskantatilasto on kuitenkin alipeittoinen eräiden puuintensiivisten rakennusten osalta. Tilastosta kokonaan puuttuva maatalousrakentaminen ja alipeittoiset talotyypit (varastorakennukset, muut rakennukset) on täydennetty 'Rakennus- ja asuntotuotanto' -tilaston perusteella. Nämä molemmat tilastot laaditaan Väestörekisterikeskuksen kokoamien rakennushankeilmoitusten perusteella. Rakennustuotannosta tilastosta julkaistaan lyhyt aikasarja Tilastokeskuksen tietokantapalvelussa. Tämän tutkimuksen käytössä on ollut Tilastokeskukselta hankitut pidemmät aikasarjat ja Väestörekisterikeskuksesta hankittu kohdekohtainen rakennusrekisteri.

Tilastojen rakennusluokitus (Tilastokeskus, Rakennusluokitus)
A Asuinrakennukset
Erilliset pientalot - yhden ja kahden asunnon erillistalot,
Rivi- ja ketjutalot - vähintään kahden ja kolmen asunnon rivi- ja ketjutalot,
03 Asuinkerrostalot - kerrostalot, luhtitalot,
B Kesämökit
C Liikerakennukset - myymälärakennukset, myymälähallit, hotellit, ravintolat
D Toimistorakennukset
E Liikenteen rakennukset - pysäköintitalot, kulkuneuvojen suoja- ja huoltorakennukset, tietoliikenne rakennukset
F Hoitoalan rakennukset - sairaalat, terveyskeskukset,
G Kokoontumisrakennukset - teatteri ja konserttirakennukset, kirjastot museot, näyttelyrakennukset, urheilu- ja kuntoilurakennukset
H Opetusrakennukset - oppilaitokset, korkeakoulut,
L Palo- ja pelastustoimenrakennukset
J Teollisuusrakennukset - teollisuushallit, voimalaitosrakennukset, teollisuus- ja

pienteollisuustalot

K Varastorakennukset - teollisuus ja kauppavarastot, öljy- ja kaasusäiliöt,

M Maatalousrakennukset - navetat, sikalat, kanalat, eläinsuojat, maneesit, viljakuivaamot, kasvihuoneet, turkistarhat,

N Muut rakennukset - saunarakennukset, talousrakennukset, asuinrakennusten autotallit..

Tilastoista ja rakennusrekisteristä saadaan tieto rakennuskannan kerrosalasta. Tämä tieto muutetaan rakennusosien määräksi ominaislukumenetelmällä (rakenteen pinta-ala/rakennuksen kerrosala tai rakennuksen pinta-ala). Ominaisluvut vaihtelevat rakennustyypin ja rakennuksen koon funktiona. Esimerkiksi kerrosalalla mitattuna pienissä rakennuksissa ulkoseinää on enemmän kuin isoissa rakennuksissa. Ominaisluvut määritetään otannoilla toteutuvasta rakentamisesta (Tienhaara, 1987).

Puumateriaalin tilavuutta johdettuna talonrakennuskannan laajuudesta tarkasteltiin jaolla:

- hirsirakenteiset ulko- ja väliseinät,
- rakennuksien runko (ulko- ja väliseinät, ala-, väli- ja yläpohjat),
- ulkovaipan laudoitukset (julkisivut ja katealusta),
- sisätilojen paneloinnit (seinä-, katto-, ja lattia pinnat) (vaneri, lastulevy, kuitulevy)
- puuikkunat ja ovet.

Puu pääasiallisena kantavana rakennusmateriaalina ja julkisivumateriaalina on rakennus-hankeilmoituksessa kysyttyjä tietoja ja saatavissa rakennusrekisteristä. Puun käytöstä muissa rakennusosissa on tehty määrävälein otantatutkimuksia ja näitä tietoja hyödynnettiin muiden rakennusosien puun käytön arvioinnissa.

Rakennushankeilmoituksista ja markkinatutkimuksista saadaan tieto puurakenteiden markkinaosuuksista. Puun määrä (tilavuus) rakenteessa on laskettu rakenteiden kuvausten perusteella. Rakennekuvauksia julkaisevat tuotetoimittajat sekä kootusti Rakennustietosäätiö mm. RATU -kortistossa. Puumateriaalin tilavuuteen laskettiin vain rakennuksiin kiinnitetyt puutuotteet. Hiilivarantoon ei lasketa jalostusketjun sivutuotteita (kuoret, purut, lastut) eikä rakennustuotteiden, rakenteiden ja rakennusten valmistuksen yhteydessä syntyvää hukkaa.

Oma puutuotteiden ryhmä rakennuksissa on kalusteet. Rakennuksien kalusteiden määrä on arvioitu asunkerrostalossa käytettyjen kiintokalusteiden osalta. Niiden pääasiallinen materiaali on lastulevy. Erään tutkimuksen mukaan (Ruuska, Häkkinen, Vares et al. 2013)[18] kiintokalusteissa olevan lastulevyn määrä voi olla minimitapauksessa noin 7 kg/kerros-m^2 ja maksimitapauksessa noin 12 kg/kerros-m^2. Tässä, karkeassa arviossa, on käytetty esimerkkirakennuksen kiintokalusteiden määrää (9,8 kg/kerros-m^2) asuinrakennuksille ja sen lisäksi myös liike-, toimisto, hoitoala- ja opetusrakennuksille. Muitten rakennustyyppien osuus kannasta on pieni ja oletuksena on, että myös puupohjaisia kiintokalusteita käytetään niissä hyvin vähän.

[18] Ruuska, A., Häkkinen, T., Vares, S., et al. 2013. Rakennusmateriaalien ympäristövaikutukset. selvitys rakennusmateriaalien vaikutuksesta rakentamisen kasvihuonekaasupäästöihin, tiivistelmäraportti. Ympäristöministeriön raportteja 8/ 2013. Helsinki 2013, Ympäristöministeriö. rakennetun ympäristön osasto. ISBN 978-952-11-4154-6 (pdf), ISSN 1796-1637 (verkkoj.)

4.1.2 Muut puurakenteet

Rakennusrekisterin talonrakennuskannan lisäksi on olemassa vähäisiä rakennuksia, jotka eivät tarvitse lainkaan rakennuslupaa tai niille riittää toimenpidelupa. Käytäntö on kuntakohtainen. Esimerkiksi Espoossa on sallittua rakentaa ilman rakennuslupaa:

- asemakaava-alueella pientalotontilla erillinen, korkeintaan 12 m^2 suuruinen piharakennelma,
- asemakaava-alueen ulkopuolella 20 m^2 suuruinen piharakennelma,
- enintään 5 m^2 suruinen jätesuoja tai katos,
- tavanomainen leikkimökki tai pieni kasvihuone.

Puutuotteita käytetään myös talonrakennusten piharakentamisessa (aidat, erilliset terassit, pergolat). Vähäisten puurakennusten ja muiden puutuotteiden määrät rakennetussa ympäristössä on arvioitu teollisuuden (Tilastokeskus, Teollisuustuotanto) ja puutavarakaupan toimitustietojen pohjalta. Teollisuuden ja kaupan toimituksista osan on oletettu korvaavan vanhoja rakenteita.

Puuta käytetään myös infrarakenteissa (sillat, laiturit, pylväät, paalut, liikuntapaikkojen rakenteet). Infrarakenteiden puun osuus on laskettu teollisuuden tuotantotiedoista (Tilastokeskus, Teollisuustuotanto) ja inventoimalla lopputuotteita rekistereiden avulla (mm. Jyväskylän Yliopisto, Liikuntapaikkarekisteri).

4.1.3 Puisten rakennusosien hiilisisältö

Puumateriaalin tilavuus muutettiin ensin puumateriaalin painoksi, sitten CO_2-pitoisuudeksi ja edelleen hiilimääräksi. Esimerkiksi sahatavaralle kertoimet ovat:

- sahatavaran tiheys toimituskosteudessa 450 kg/m^2,
- yhden sahatavarakilon hiilidioksidisisältö (CO_2) 1,55 kg (Taulukko 1),
- hiilen osuus hiilidioksidista 12/44 = 0,27 laskettuna hiilidioksidin (CO_2) moolipainosta 44 g/mol (12+2*16= 44 g).

4.2 Tulokset

Seuraavilla sivuilla on esitetty rakennetun ympäristön hiilivaranto lähtien puutuotteiden määrästä, muutettuna kasvihuonekaasupitoisuudeksi (CO_2) ja edelleen hiilitonneiksi (C):

- Taulukko 22. Talonrakennuskannan puurakenteet, 1000 tonnia (toimituskosteudessa) vuoden 2016 joulukuussa.
- Taulukko 23. Talonrakennuskannan kasvihuonekaasusisältö (CO_2) vuoden 2016 joulukuussa.
- Taulukko 24. Talonrakennuskannan hiilivaranto (C) vuoden 2016 joulukuussa.
- Taulukko 25. Muun rakennetun ympäristön puurakenteet, sitomat kasvihuonekaasut ja hiilivaranto vuoden 2016 joulukuussa.

Talonrakentamisessa puutuotteita käytetään pienissä rakennuksissa (A01 Erilliset pientalot, B Kesämökit) sekä niiden pihapiiriin rakennettavissa talousrakennuksissa (N Muut rakennukset). Yhteensä nämä kattavat 2/3 talonrakennuskannan puurakenteista (Taulukko 1).

Kun mukaan luetaan muut asuinrakennukset (A02; A03) ja pääasiassa asuinrakennusten yhteyteen rakennettavat vähäiset piharakennukset ja rakennelmat muun rakennutun

ympäristön puutuotteista (Taulukko 4), nousee "asuminen toimialan" osuus koko puurakennekannasta lähes 32 miljoonaan tonniin. Se on 70 % rakennettuun ympäristöön varastoituneesta puutavaramäärästä eli huomattavasti suurempi osuus kuin asuinrakennusten osuus kerrosalasta (53 %) tai asuinrakennusten osuus rakennetun ympäristön arvosta (42 %).

Taulukko 22. Talonrakennuskannan puurakenteet, 1000 tonnia (toimituskosteudessa) vuoden 2016 joulukuussa (Rakennuksien luokat (Rakennusluokitus 1994)[19] ovat A01 - Asuinrakennukset, erilliset pientalot, A02 - Asuinrakennukset, rivi ja ketjutalot, A03 - Asuinrakennukset, kerrostalot, B - Vapaa-ajan asuinrakennukset, C - Liikerakennukset, D - Toimistorakennukset, E - Liikenteen rakennukset, F - Hoitoalan rakennukset, G - Kokoontumisrakennukset, H - Opetusrakennukset, L - Palo- ja pelastustoimenrakennukset, J - Teollisuusrakennukset, K - Varastorakennukset, M - Maatalousrakennukset, N - Muut rakennukset). Erikseen arvioidu kiintokalusteiden lastulevyn määrä.

Rakennusluokat	A 01	A 02	A 03	B	C, D, E	F, G, H, L	J, K	M	N	Yhteensä
	1000 t	1000 t	1000 t	1000 t	1000 t	1000 t	1000 t	1000 t	1000 t	1000 t
Hirsirakenteiset ulko- ja väliseinät	459	0	0	2 719	27	103	0	1 055	271	4 635
Rakennuksien runko (ulko- ja väliseinät, ala-, väli- ja yläpohjat)	5 717	761	185	732	433	170	1 485	881	836	11 200
Ulkovaipan laudoitukset (julkisivut ja katealusta)	1 939	221	73	224	168	105	545	578	370	4 224
Sisätilojen paneloinnit (seinä-, katto-, ja lattia pinnat)	1 488	67	60	495	82	18	114	76	257	2 658
Rakennuslevyt	2 898	239	563	114	183	71	81	63	6	4 217
Ikkunat ja ovet	1 444	287	692	155	114	49	727	116	106	3 689
yhteensä	13 946	1 575	1 573	4 440	1 008	516	2 952	2 768	1 846	30 624
Rakennuksien kiintokalusteet (karkea arvio) (lastulevy)										4 026

[19] http://tilastokeskus.fi/meta/luokitukset/rakennus/001-1994/index.html

Taulukko 23. Talonrakennuskannan hiilidioksidisisältö (CO_2) vuoden 2016 joulukuussa (Rakennuksien luokat (Rakennusluokitus 1994)[20] ovat A01 - Asuinrakennukset, erilliset pientalot, A02 - Asuinrakennukset, rivi ja ketjutalot, A03 - Asuinrakennukset, kerrostalot, B - Vapaa-ajan asuinrakennukset, C - Liikerakennukset, D - Toimistorakennukset, E - Liikenteen rakennukset, F - Hoitoalan rakennukset, G - Kokoontumisrakennukset, H - Opetusrakennukset, L - Palo- ja pelastustoimenrakennukset, J - Teollisuusrakennukset, K - Varastorakennukset, M - Maatalousrakennukset, N - Muut rakennukset). Erikseen arvioidu kiintokalusteiden lastulevyn määrä.

Rakennusluokat	A01	A02	A03	B	C, D, E	F, G, H, L	J, K	M	N	Yhteensä
	1000 t CO_2	1000 t CO_2	1000 t CO_2	1000 t CO_2	1000 t CO_2	1000 t CO_2	1000 t CO_2	1000 t CO_2	1000 t CO_2	1000 t CO_2
Hirsirakenteiset ulko- ja väliseinät	843	0	0	4 983	50	189	0	1 934	497	8 495
Rakennuksien runko (ulko- ja väliseinät, ala-, väli- ja yläpohjat)	10 480	1 396	338	1 341	793	312	2 034	1 615	1 533	19 842
Ulkovaipan laudoitukset (julkisivut ja katealusta)	3 555	406	134	411	309	191	747	1 058	679	7 489
Sisätilojen paneloinnit (seinä-, katto-, ja lattia pinnat)	2 729	122	110	908	151	34	158	140	471	4 822
Rakennuslevyt	5 316	444	1 033	207	322	134	148	71	52	7 726
Ikkunat ja ovet	2 646	526	1 269	284	210	90	997	211	194	6 428
yhteensä	25 568	2 895	2 883	8 134	1 834	950	4 083	5 030	3 426	54 803
Rakennuksien kiintokalusteet (karkea arvio) (lastulevy)										4 268

[20] http://tilastokeskus.fi/meta/luokitukset/rakennus/001-1994/index.html

Taulukko 24. Rakennuskannan hiilisisältö, laskettuna C:na, 1000 tonnia (Rakennuksien luokat (Rakennusluokitus 1994)[21] ovat A01 - Asuinrakennukset, erilliset pientalot, A02 - Asuinrakennukset, rivi ja ketjutalot, A03 - Asuinrakennukset, kerrostalot, B - Vapaa-ajan asuinrakennukset, C - Liikerakennukset, D - Toimistorakennukset, E - Liikenteen rakennukset, F - Hoitoalan rakennukset, G - Kokoontumisrakennukset, H - Opetusrakennukset, L - Palo- ja pelastustoimenrakennukset, J - Teollisuusrakennukset, K - Varastorakennukset, M - Maatalousrakennukset, N - Muut rakennukset). Erikseen arvioitu kiintokalusteiden lastulevyn määrä.

Rakennusluokat	A 01	A 02	A 03	B	C, D, E	F, G, H, L	J, K	M	N	Yhteensä
	1000 t C	1000 t C	1000 t C	1000 tC	1000 t C	1000 t C	1000 t C	1000 t C	1000 t C	1000 t C
Hirsirakenteiset ulko- ja väliseinät	230	0	0	1 359	14	52	0	527	135	2 317
Rakennuksien runko (ulko- ja väliseinät, ala-, väli- ja yläpohjat)	2 858	381	92	366	216	85	555	441	418	5 412
Ulkovaipan laudoitukset (julkisivut ja katealusta)	970	111	36	112	84	52	203	289	185	2 043
Sisätilojen paneloinnit (seinä-, katto-, ja lattia pinnat)	744	34	30	248	41	9	42	38	129	1 316
Rakennuslevyt	1 449	120	282	56	88	37	40	19	14	2 106
Ikkunat ja ovet	721	143	347	77	57	25	272	58	53	1 753
yhteensä	6 972	789	787	2 219	501	260	1 112	1 373	935	14 946
Rakennuksien kiintokalusteet (karkea arvio) (lastulevy)										1 164

[21] http://tilastokeskus.fi/meta/luokitukset/rakennus/001-1994/index.html

Taulukko 25. Muun rakennetun ympäristön hiilivaranto.

Muut rakennustyypit	Paino, (toimituskosteudessa) 1000 t	Puumateriaalit, hiilisisältö CO_2 1000 t	Hiilisisältö, 1000 t C
Vähäiset rakennukset toimenpideluvalla tai luvatta	5 180	9 495	2 590
Piharakenteet (terassit, aidat, …)	3 500	6 415	1 750
Infra (sillat, laiturit, pylväät, liikuntapaikat, ...)	7 105	13 029	3 553
Yhteensä	15 785	28 939	7 893

4.3 Yhteenveto

Rakennetun ympäristön hiilivaranto laskettiin puutuotteiden loppukäytön perusteella (22,8 miljoonaa tonnia (ilman kiintokalusteita) tai 24 miljoona tonnia (kiintokalusteiden kanssa)). Eniten hiiltä on sitoutunut rakenteelliseen sahatavaraan ja hirsiin. Puulevyjen osuus on näihin verrattuna vähäinen.

Puulevyjä, kuten esimerkiksi lastulevyä, käytetään rakennuksien kiintokalusteissa. Kun oletetaan, että kaikki kiintokalusteet ovat valmistettu pääosin lastulevyistä, kiintokalusteiden hiilivaraston osuus rakennuskannasta on noin 7 %. Toisaalta kalusteet eivät ole yhtä pitkäikäisiä kuin rakennukset, ja näin ollen kiintokalusteissa oleva hiilivaranto palaa käyttönsä jälkeen aikaisemmin takaisin luontoon.

Eniten hiilivarantoa on erillisissä pientaloissa (A01; 31 %) ja infrarakenteissa (16 %). Puuta käytetään paljon myös ilman rakennuslupaa rakennettavissa vähäisissä rakennuksissa (11 %), kesämökeissä (B; 10 %) ja maatalous ja muissa talousrakennuksissa (M & N; 10 %). (Taulukko 26).

Taulukko 26. Rakennetun ympäristön hiilivaranto (arvio) vuoden 2016 joulukuussa.

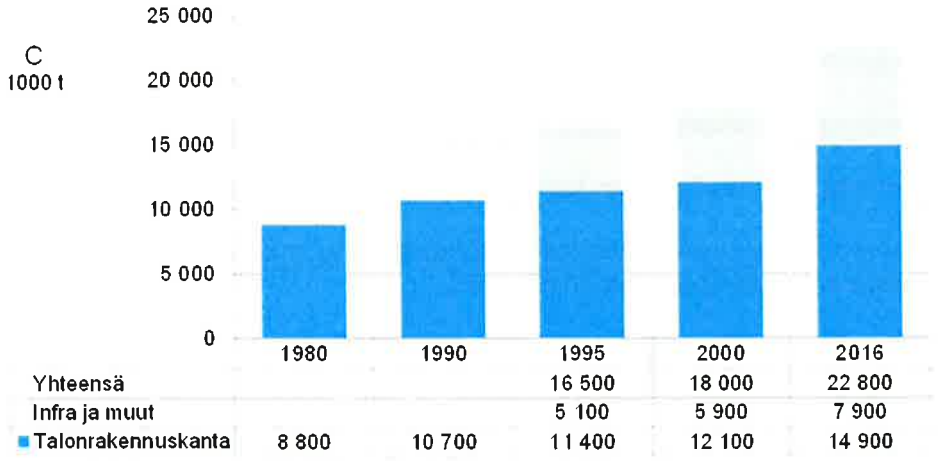
		Puumateriaalit 1000 t (toimitus-kosteudessa)	Puumateriaalit, hiilisisältö, CO_2 1000 t	Puumateriaalit, hiilisisältö C 1000 t	Osuudet, %
A01	Erilliset pientalot	13 946	25 568	6 972	31 %
B	Kesämökit	4 440	8 134	2 219	10 %
M, N	Maatalous- ja muut (talous)rakennukset	4 614	8 455	2 307	10 %
A02, A03	Rivi- ja kerrostalot	3149	5778	1575	7 %
J, K	Teollisuus- ja varastorakennukset	2 952	4 083	1 112	5 %
C,D,E,F,G,H,L	Liike-, toimisto ja julkiset rakennukset	1524	2784	761	3 %
Vähäiset rakennukset		5 180	9 495	2 590	11 %
Piharakenteet		3 500	6 415	1 750	8 %
Infrarakenteet		7 105	13 029	3 553	16 %
Yhteensä		46 409	83 742	22 838	100 %

Suomen metsät sitoivat 2000-luvulla keskimäärin 34 milj. tonnia CO2 EKV (Lehtonen et al., 2016). Tämän selvityksen tuloksen mukaan rakennetun ympäristön koko kasvihuonekaasu (CO2 EKV) –varanto on 83,7 milj. tonnia, mikä vastaa 2-2,5 vuoden metsien nettokasvua.

Talonrakennuskannan hiilivarannosta on tehty arviot vuosille 1980, 1990 ja 1995 (Pingoud & Perälä, 2000) ja vuodelle 2005 (Pingoud, Perälä, Soimakallio & Pussinen, 2003). Vuosilta 1995 ja 2000 on arvioitu myös infra- ja muiden rakenteiden hiilivaranto tässä raportissa esitetyn mukaisesti (Kuva 5).

Talonrakennuskannan hiilivaranto on kasvanut vuodesta 2000 vuoteen 2016 noin 23 %. Samaan aikaan rakennuskannan kerrosala on kasvanut 30 %. Hiilivarannon hitaampi kasvu johtuu talonrakennustuotannon rakenteesta. Hiiltä paljon varastoivien pientalojen sijaan on

rakennettu kerrostaloja. Puun käyttö ympäristörakentamisessa (vähäiset rakennukset, piharakenteet, infrarakenteet) on kasvattanut suosiota ja hiilivaranto onkin näissä rakenteissa kasvanut 34 %.



Kuva 5. Rakennetun ympäristön hiilivaranto.

5 Herkkyystarkastelut, merkityksen ja potentiaalien tarkastelu

5.1 Johdanto

Rakennusmateriaalien käytön herkkyystarkastelu tehtiin

- sahatavaralle arvioimalla tulokset kahdella vaihtoehtoisella hiilijalanjäljellä
- kipsilevylle arvioimalla tulokset käyttäen kahta vaihtoehtoista hiilijalanjälkeä
- betonijulkisivulle laskemalla tulokset kahdelle vaihtoehtoiselle rakenteelle vertaamalla elementtirakenteisia seiniä lämpörapattuihin seiniin
- taloratkaisulle ottamalla arvioon lisänä mukaan puutaloratkaisu, joissa puukerrostalon ensimmäinen kerros rakennetaan betonisena
- betonirakentamiselle ottamalla lisänä mukaan betonipinnan karbonatisoitumisen vaikutus
- puurakentamiselle ottamalla lisänä huomioon tapaus, jossa rakennuksen elinkaaren päättymisen jälkeen puumateriaalit hyödynnetään lämmöntuotannossa ja varastoitunut hiili palaa takaisin luontoon
- puurakentamiselle tarkastelemalla lisänä tapausta, jossa palokoteloinnit on jätetty kokonaan pois.
  Perinteisesti puurakennuksien palosuojaus on hoidettu kipsilevykoteloinneilla, palosuoja-aineilla sekä vesi- tai sumusammutusjärjestelmällä. Uudet puukerrostalojen palomääräyksien tarkennukset sallivat puurakenteiden jäämisen osittain näkyviin (20 % pinnoista).

Tulosten merkityksellisyyttä tutkittiin myös korjausrakentamisen sekä täydennysrakentamisen osalta.

5.2 Herkkyystarkastelut

Materiaalien alkuperä ja kasvihuonekaasupäästöt

Sahatavara

Rakennusmateriaalien alkuperällä on merkitystä lopputulokseen ja tämä pätee erityisesti puutuotteiden osalta, jossa sivutuotteiden hyödyntäminen vaikuttaa tulokseen. Esimerkiksi sahatavaran valmistuksessa voidaan hyödyntää oman tuotannon sivutuotteita kuivatusprosesseissa tai vaihtoehtoisesti myydä sivutuotteet ja ostaa lämpöä paikalliselta lämpötoimittajalta. Jos ostettu lämpö on valmistettu fossiilisia polttoaineita käyttäen, tulos tuotevalmistuksen osalta on epäedullinen.

VTT:n Ilmari tietokannassa sahatavaran valmistuksessa hyödynnetään oman tuotannon sivutuotteita ja lisäksi ostetaan uusiutuvilla energialähteillä tuotettua lämpöä kuivatukseen. Tämän mukaan sahatavaran valmistuksen kasvihuonekaasupäästöt ovat pienet (0,092 $kgCO_2e$ /kg, toimitettuna ja hukallisena). Käyttämällä valmistuksessa fossiilisia polttoaineita sahatavaran valmistuksen kasvihuonekaasupäästöt voivat olla jopa 70 % isommat (esim. 0,156 $kgCO_2$/kg).

Laskennan mukaan puukerrostalon hiilijalanjälki oli 170 kg $CO_2e/br\text{-}m^2$ (rankarakenteinen suurelementti, rakennus D), mutta käyttämällä epäedullisemmin valmistettua sahatavaraa hiilijalanjälkeä tulos olisi ollut 172 $kgCO_2e/br\text{-}m^2$, mikä on vain noin 1 % suurempi kuin arvo,

joka laskettiin käyttäen pienempää sahatavaran hiilijalanjälkeä. Tämä johtuu sahatavaran kohtuullisen vähäisestä osuudesta rakennuksen koko massasta.

Kipsilevyt

Puukerrostaloissa käytetään suhteellisen paljon kipsilevyjä. Kipsilevyn valmistuksessa raaka-aineina käytetään luonnonkipsiä, teollisuuskipsiä ja kierrätyskipsiä ja niiden keskinäisillä osuuksilla on myös merkitystä kipsilevyjen päästöihin.

Tässä käytetyn kipsilevyn kasvihuonekaasupäästöt ovat 0,42 kg CO_2/kg tuotetta. Toisaalta esimerkiksi Gyproc GN 13, EPD:n mukaan vastaava päästö olisi 0,34 kg/CO_2/kg (toimitettu ja hukallinen). Tässä selvityksessä puukerrostalon hiilijalanjälki oli 170 kg/br-m^2 (rankarakenteinen suurelementti, rakennus D), mutta käyttämällä edullisempaa kipsilevypäästöprofiililla puukerrostalon hiilijalanjälki on 166 kg/br-m^2: Tämä on noin 2 % pienempi kuin lähtöarvona laskettu.

Edellistä selvästi isompi merkitys on kipsilevyjen käyttömäärillä. Taulukko 27 esittää tuloksen tapaukselle, jossa palokotelointeja kipsilevyllä ei tehty. Rakennuksen D tapauksessa hiilijalanjälki ilman palokipsilevyjä on nyt 157 kg CO_2e/br-m^2, mikä on noin 8 % pienempi kuin rakennus, jossa käytettiin palokipsilevyjä

Taulukko 28 esittää puukerrostalojen hiilijalanjäljen tapaukselle, jossa palokipsilevyjä ei käytetty ja säästöt (erotukset) betonikerrostalon nähden.

Taulukko 27. Palokipsilevyjen vaikutus. Puukerrostalomateriaalien (A – E) hiilijalanjälki tapauksessa jossa puukerrostalojen palokipsilevytyksiä ei käytetä. Säästetyt päästöt absoluuttisina arvoina (kgCO2e/br-m^2) sekä %:na.

Rakennus	A	B	C	D	E
t CO_2e /rakennus (perustapaus)	325	321	301	326	310
t CO_2e /rakennus (ilman palokipsilevyjä),	306	299	277	302	290
kgCO_2e /br-m^2 (perustapaus)	169	167	156	170	161
kgCO_2e /br-m^2 (ilman palokipsilevyjä)	159	155	144	157	151
Säästö (perustapaus – tapaus ilman palokipsilevyjä) kgCO_2e/br-m^2 ja %	10 (6 %)	12 (7 %)	12 (8 %)	12 (7 %)	11 (7 %)

Taulukko 28. Palokipsilevyjen vaikutus rakennuksen hiilijalanjälkeen. Puukerrostalomateriaalien (A – E) hiilijalanjälki tapauksessa jossa puukerrostalojen palokipsilevytyksiä ei käytetä. Säästetyt päästöt on laskettu betonikerrostalon (F) ja puukerrostalon (A - E) päästöjen erotuksena absoluuttisina ja suhteellisina arvoina.

Rakennus	A	B	C	D	E	F
t CO_2e / rakennus (ilman palokipsilevyjä),	306	299	277	302	290	542
Abs. säästö, tonnia (betoni – puurakennus)	236	243	265	240	252	0
säästö, %	44 %	45 %	49 %	44 %	46 %	0 %

Tuloksen mukaan puukerrostalon hiilijalanjälkisäästö betonielementtikerrostaloon nähden ovat 44…49 %, kun palokipsilevykotelointeja ei käytetä.

Hiilisisältö ja varasto

Puumateriaalissa on noin puolet hiiltä. Hiili on varastoitunut puutuotteisiin koko niiden käyttöikänsä aikana. Silloin kuin puutuotteet poistetaan käytöstä ja poltetaan lämmöntuotannossa, sitoutunut hiili vapautuu takaisiin ympäristöihin. Puutuotteiden osalta tämä on noin 288…574 tonnia CO_2 (Taulukko 14). Toisaalta energia, joka saadaan puutuotteiden energiahyödyntämisellä voi korvata fossiilisia polttoaineita.

Myös betonituotteet sitovat hiiltä karbonatisoitumisprosessin yhteydessä ilmassa olevan hiilidioksidin reagoidessa betonin kalsiumyhdisteiden kanssa. Karbonatisoituminen riippuu mm. betonissa olevan kalsiumhydroksidin määrästä, ympäröivän ilman hiilidioksidimäärästä sekä betonipinnan diffuusiovastuksesta hiilidioksidin tunkeutumista vastaan.

Kirjallisuusviitteen mukaan[22] betonin karbonatisoituminen voidaan laskea kaavalla:

$A = 0{,}75 \times C_e \times CaO \times \alpha_H \times M_{CO2}/M_{CaO}$ (kg m^{-3}), jossa

Ce on sementtimäärä betonissa kg/m^3,

CaO on CaO:n sisältö sementissä,

α_H on betonin hydratoitumisaste ja

M on CaO:n ja CO_2:n moolipaino.

Karbonatisoituminen alkaa pinnasta ja etenee syvemmälle rakenteeseen useamman vuoden aikana. 50 vuoden iässä betonipinta voi olla karbonatisoitunut jopa 20 – 30 mm.

Käyttämällä edellä esitettyä laskentakaavoja ja tekemällä karkeita oletuksia sementin määristä, karbonatisoitumisen syvyyksistä ja sementin hydratoitumisasteesta voidaan laskea suurusluokkaluku betonin karbonatisoitumiselle. Seuraavien olettamuksien perusteella päätytään lukuun 13,8 tonnia CO_2 / betonikerrostalon 50 v. käyttö:

[22] Yoon et al. 2007. Effect of global climatic change on carbonisation progress of concrete. Atmospheric Environment 41 (2007) 7274-7285. Available online at www.sciencedirect.com

- betonikerrostalon betonirakenteiden pinnat karbonatisoituvat 50 vuoden käyttöiän aikana 2 cm (karkeassa arviossa ei erotella kosteuden ja peittävien materiaalien vaikutusta),
- sementtiä käytetään keskimäärin 280 kg/m^3 (ottamatta huomioon sementtimäärien vaihtelua betoneissa),
- betonin hydratoitumisaste on 0,75 (ottamatta huomioon esimerkiksi kosteuden vaikutusta hydratoimisasteeseen)
- Sementin CaO pitoisuus 60% (ottamatta huomioon CaO-pitoisuuden vaihtelua eri tyyppisissä sementeissä)

Rakennuksien hiilisisältö puutuotteiden osalta oli 288...574 tonnia CO_2/puukerrostalo ja 77 tonnia/betonikerrostalo. Jos betonikerrostalon puupohjaisten materiaalien hiilisisältöön lisätään betoniin sisältämä hiili karbonatisoitumisen vuoksi, päätytään lukuun 90,8 tonnia. Tällöin absoluuttinen ero hiilisisällön osalta on noin 197 ... 483 tonnia.

Puukerrostalon ensimmäinen kerros on betoninen

Uudisrakennettujen puukerrostalojen hiilijalanjäljen merkitystä perustapauksessa tutkittiin 4-kerroksisen rakennuksen osalta, jossa kaikki kerrokset olivat puuta. Todellisuudessa kuitenkin usein ensimmäinen kerros puukerrostaloissa on ollut betoninen, johon voi olla sijoitettuna autotalli, väestönsuoja, varasto ja/tai saunatilat. Selvityksessä arvioitiin vaihtoehto, jossa puukerrostalon ensimmäinen kerros on betoninen, mutta tässä oletettiin kuitenkin, että myös ensimmäinen kerros on asuinkäytössä.

Puukerrostalojen substituutiovaikutukset tapauksissa, jossa ensimmäinen kerros on rakennettu betonisena ja 3 kerrosta puurakenteisena esitetään taulukossa Taulukko 29.

Taulukko 29. Puukerrostalomateriaalien hiilijalanjälki ja päästöjen kasvu (kgCO_2e/br-m^2) perusratkaisun osalta sekä tapauksessa jossa ensimmäinen kerros toteutettu betonirakenteisena (3 kerrosta vastaavalla puurakennusjärjestelmällä).

Rakennus	A	B	C	D	E
kgCO_2e /br-m^2 (perusratkaisu)	169	167	156	170	161
kgCO_2e /br-m^2 (ensimmäinen kerros betoni)	191	189	182	191	185
Päästöjen kasvu, kgCO_2e /br-m^2	22	22	25	22	24

Taulukko 30. Puukerrostalomateriaalien hiilijalanjälki (t CO_2e/rakennus, kg CO2e / br-m^2) ja säästetyt päästöt absoluuttisina arvoina (t) sekä %:na betonikerrostalon (F) nähden. Puukerrostaloissa 1 krs on toteutettu betonirakenteisena ja 3 krs vastaavalla puurakennusjärjestelmällä (Ab – Eb).

Rakennus	Ab (1 bet+ 3 puu)	Bb (1 bet+ 3 puu)	Cb (1 bet+ 3 puu)	Db (1 bet+ 3 puu)	Eb (1 bet+ 3 puu)	F (4 bet)
t CO_2e / rakennus	367	364	349	368	356	542
kgCO2e / br-m^2	191	189	182	191	185	282
Säästö, t	175	178	192	174	186	0
Säästö, %	32 %	33 %	36 %	32 %	34 %	0 %

Puukerrostalossa käytetty betonimäärä nostaa puukerrostalon kasvihuonekaasupäästöjä. Tapauksessa jossa puukerrostalon ensimmäinen kerros rakennetaan betonisena puukerrostalon CO_2e-päästöt kasvavat keskimäärin noin 22…25 kg/br-m^2.

Kun puukerrostalon ensimmäinen kerros on betoninen, silloin kasvihuonekaasujen säästöt (erotus) ovat noin 32…36 %, perusratkaisuna olleeseen betonielementtirakennuksen nähden.

Betonielementtikerrostalo tai betonikerrostalo lämpörappauksella

Perinteinen tapaa rakentaa betonikerrostalo on käyttää betonielementtejä. Kuitenkin myös uudisrakentamisessa on käytetty ratkaisua, jossa betonisen ulkokuoren sijasta on rapattu lämmöneriste (lämpörappaus) (Taulukko 31).

Taulukko 31. Vertailu lämpörapattuun betoniin. Puukerrostalomateriaalien (A – E) hiilijalanjälki kgCO_2e/rakennus, kgCO2e/br-m2 ja säästetyt päästöt lämpörapatun betonikerrostalon (F) nähden absoluuttisina arvoina sekä %:na.

Rakennus	A	B	C	D	E	F*
t CO_2e / rakennus	325	321	308	326	310	509
kgCO_2e / br-m^2	169	167	156	170	161	265
Säästö, t /rakennus	184	187	208	183	198	0
Säästö, %	36 %	37 %	41 %	36 %	39 %	0 %

*lämpörapattu betonirakennus

Kun betonisen kerrostalon ulkoseinäratkaisuna on lämpörapattu betoni, silloin kasvihuonekaasujen säästö betonielementtiratkaisun nähden on 6 %. Puukerrostalojen hiilijalanjälkisäästöt betonielementtikerrostaloratkaisun osalta olivat 40…44 % (Taulukko 13), mutta kun lämpörapatun betonikerrostalon kokonaispäästöt ovat pienempiä elementtitaloon verrattuna, niin myös säästöt puukerrostalojen osalta jäävät pienemmäksi. Puurakentamisen KHK-säästöt (erotus) lämpörapattuun betonikerrostaloon verrattuna ovat noin 36…41 % (Taulukko 31).

6 Yhteenveto

Tuloksien mukaan puukerrostalojen materiaalipohjaiset kasvihuonekaasupäästöt eri puurakennusjärjestelmillä ovat noin 156...170 $kgCO_2e/br\text{-}m^2$. Näin ollen ero eri puurakennejärjestelmien välillä on pieni. Tässä tarkastelussa puukerrostalon kaikki 4 kerrosta rakennettiin puurakennejärjestelmillä.

Silloin kuin puukerrostalon ensimmäinen kerros on betonia ja muita kuin puumateriaaleja käytetään enemmän, puukerrostalojen hiilijalanjälki on lähellä 200 $kgCO_2e/br\text{-}m^2$ (182...191 $kgCO_2e/br\text{-}m^2$).

Suomen rakennuskannan hiilivaranto ilman kiintokalusteita on 22 838 1000 tonnia C. Eniten hiilivarantoa on erillisissä pientaloissa (A01; 31 %) ja infrarakenteissa (16 %). Koko asuinrakennuskannan hiilivaranto on yhteensä 38 % (rivi- ja kerrostalojen hiilivaranto on yhteensä 7 %). Perinteisesti puusta on rakennettu erillisiä pientaloja, toisaalta viime vuonna myös puukerrostalojen rakentaminen on lähtenyt kasvamaan johtuen mm. siitä, että uusien palomääräyksien mukaan voidaan rakentaa jopa 8-kerroksisia puurunkoisia rakennuksia. Vuodesta 1996 - 2017 (tilanne 23.8.2017) on kaikkiaan valmistunut 59 asuinpuukerrostaloa, jossa 1437 asuntoa ja 4 toimistopuukerrostaloa, yhteensä 29 824 $br\text{-}m^2$ (Puuinfo[23]).

Viime vuonna asuinkerrostalojen tuotanto oli 1,3 miljoona kerrosneliötä, josta puukerrostalokohteita oli vain muutama: Seinäjoella, Mäihä (5 850 $k\text{-}m^2$), Kajaanin Rajamiehentie (1 200 $k\text{-}m^2$), Imatralla (3 krs. 1 talo) ja Helsinki Honkasuo (7 400 $k\text{-}m^2$). Tämän mukaan puukerrostalojen osuus valmistuneista kerrosneliöistä on ollut erittäin pieni, mutta potentiaali kasvattaa volyymiä on suuri.

Esimerkiksi jos uudisrakentamisessa puukerrostalojen markkinaosuutta voisi nostaa noin kymmenen prosenttia, tuotanto olisi 130 000 $k\text{-}m^2$.

Puukerrostalojen substituutiovaikutuksena betonielementtirakentamisen nähden säästyisi kasvihuonekaasuja noin 40...44 % (Taulukko 13). Jokaista rakennettua m^2 kohden säästyisi puurakennusjärjestelmästä riippuen 113...125 kg kasvihuonekaasupäästöjä. Yhteensä puukerrostalojen uudisrakentamisen osalta kasvihuonekaasupäästöjen säästöt olisivat noin 14 600 – 16 300 tonnia, jos 130 000 $k\text{-}m^2$ betonirakentamista korvattaisiin puukerrostalojen rakentamisella.

Puukerrostalojen hiilisisältö, laskettuna CO_2:na, oli 149...298 kg $CO_2/br\text{-}m^2$. Kasvattamalla puukerrostalojen rakentamisen osuutta voitaisiin kasvattaa myös väliaikaista hiilivarastoa merkittävästi (174 ...547 % betonirakentamisen nähden). Tämän mukaan hiilivaraston kasvu betonirakentamisen nähden olisi 14 200 tonnia ... 33 600 tonnia.

Talonrakennuskannan hiilivaranto on kasvanut vuodesta 2000 vuoteen 2016 noin 23 %. Samaan aikaan rakennuskannan kerrosala on kasvanut 30 %. Hiilivarannon hitaampi kasvu johtuu talonrakennustuotannon rakenteesta. Hiiltä paljon varastoivien pientalojen sijaan on rakennettu kerrostaloja. Puun käyttö ympäristörakentamisessa (vähäiset rakennukset, piharakenteet, infrarakenteet) on kasvattanut suosiota ja hiilivaranto onkin näissä rakenteissa kasvanut 34 %.

Suomen metsät sitoivat 2000-luvulla keskimäärin 34 milj. tonnia CO_2 EKV (Lehtonen et al., 2016). Rakennetun ympäristön koko varanto on 83,7 milj. tonnia CO_2 EKV, mikä vastaa 2-2,5 vuoden metsien nettokasvua.

[23] Puuinfo: http://www.puuinfo.fi/sites/default/files/LUKUJA%20JA%20LASKELMIA%2023.8.17.pdf (4.9.2017)

Liitteet /Lähdeviitteet

EN 15978:2011 Sustainability of construction works — Assessment of environmental performance of buildings — Calculation method.

EN 16449. Round and sawn timber - Wood and wood-based products – Calculation of the biogenic carbon content of wood and conversion to carbon dioxide

EN 16485 Round and sawn timber - Environmental Product Declarations - Product category rules for wood and wood-based products for use in construction

RunkoPes 2.0 - http://www.puuinfo.fi/suunnitteluohjeet/runkopes-20 (haettu 7.7.2017)

EPD, CLT by Stora Enso
http://assets.storaenso.com/se/buildingandliving/Documents/EPD%20-%20CLT%20by%20Stora%20Enso%202017.pdf

Environmental product declaration. Metsä Wood Spruce Plywood. Uncoated. Validity until January, 2019.
http://www.metsawood.com/global/Tools/MaterialArchive/MaterialArchive/MetsaWood-Spruce-Environmental-declaration.pdf

Leijonalevy, Suomen Kuitulevy Oy Pihlavan tehdas, RT YS 28.1 (Voimassa 17.4.2013 saakka).

Lähde: Puuinfo, Mallikerrostalo.
http://www.puuinfo.fi/sites/default/files/content/rakentaminen/suunnitteluohjeet/runkopes-20/rakennuslupapiirustukset.pdf (haettu 7.7.2017)

RT 82-11006. 2010. Ulkoseinärakenteita. Ohjeet, lokakuu 2010, 32 sivua.

RT 82-10903. Väliseinärakenteita. Ohjetiedosto, syyskuu 2007, 38 sivua.

RT 83-10902. Välipohjarakenteita. Ohjetiedosto, elokuu 2007, 36 sivua

Ruuska, A., Häkkinen, T., Vares, S., et al. 2013. Rakennusmateriaalien ympäristövaikutukset. selvitys rakennusmateriaalien vaikutuksesta rakentamisen kasvihuonekaasupäästöihin, tiivistelmäraportti. Ympäristöministeriön raportteja 8/ 2013. Helsinki 2013, Ympäristöministeriö. rakennetun ympäristön osasto. ISBN 978-952-11-4154-6 (pdf), ISSN 1796-1637 (verkkojulkaisu)

Nykänen, E., Häkkinen, T., Kiviniemi, A., Lahdenperä, P., Pulakka, S., Ruuska, A., Saari, M., Vares, S., Cronhjort, Y., Heikkinen, P., Tulamo, T., Tidwell, P. 2017. Puurakentaminen Euroopassa. LeanWood. VTT Technology 297. ISBN 978-951-38-8534-2 (URL: http://www.vtt.fi/julkaisut)

Energiateollisuus. Sähkötilasto 2016.
https://energia.fi/ajankohtaista_ja_materiaalipankki/tilastot/sahkotilastot (26.8.2017)

Energiateollisuus. Kaukolämpötilasto. 2016.
https://energia.fi/ajankohtaista_ja_materiaalipankki/tilastot/kaukolampotilastot (26.8.2017)

Jyväskylän Yliopisto, Liikuntapaikkarekisteri Lipas,
https://www.jyu.fi/sport/laitokset/liikunta/liikuntapaikat

Lehtonen, Salminen, Kallio, Tuomainen & Sievänen (2016) Skenaariolaskelmiin perustuva puuston ja metsien kasvihuonekaasutaseen kehitys vuoteen 2045, Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 36/2016, https://jukuri.luke.fi/bitstream/handle/10024/536237/luke-luobio_36_2016.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Pingoud & Perälä (2000) Arvioita puurakentamisen kasvihuonevaikutuksista, VTT Julkaisuja 840. http://www.vtt.fi/inf/pdf/julkaisut/2000/J840.pdf

Pingoud, Perälä, Soimakallio & Pussinen (2003) Greenhouse gas impacts of harvested wood products, VTT Research Notes 2189, http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2003/T2189.pdf

Tienhaara (1987) Tuotannontekijöiden käytön lyhyen aikavälin ennakointimallin soveltaminen rakennustuotannossa, TTKK diplomityö