

VTT Technical Research Centre of Finland

Moduulirakentamisen elinkaarenaikainen hiilijalanjälki

Vares, Sirje

Published: 01/01/2018

Document Version
Publisher's final version

[Link to publication](#)

Please cite the original version:

Vares, S. (2018). *Moduulirakentamisen elinkaarenaikainen hiilijalanjälki*. VTT Technical Research Centre of Finland. VTT Asiakasraportti No. VTT-CR-05695-18



VTT
<http://www.vtt.fi>
P.O. box 1000FI-02044 VTT
Finland

By using VTT's Research Information Portal you are bound by the following Terms & Conditions.

I have read and I understand the following statement:

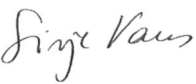

This document is protected by copyright and other intellectual property rights, and duplication or sale of all or part of any of this document is not permitted, except duplication for research use or educational purposes in electronic or print form. You must obtain permission for any other use. Electronic or print copies may not be offered for sale.



Moduulirakentamisen elinkaarenaikainen hiilijalanjälki

Kirjoittaja: Sirje Vares

Luottamuksellisuus: Julkinen

Raportin nimi Moduulirakentamisen elinkaarenaikainen hiilijalanjälki	
Asiakkaan nimi, yhteyshenkilö ja yhteystiedot Ossi Alastaro, Parmaco Oy, PL 50 33231 Tampere	Asiakkaan viite
Projektin nimi Moduulirakentamisen elinkaarenaikainen hiilijalanjälki	Projektin numero/lyhytnimi 118352
Tiivistelmä <p>Moduulirakentamisen elinkaaren hiilijalanjälki selvitettiin Parmaco Oy:n valmistaman siirtokelpoisen koulukonseptin osalta. Tulosta verrattiin koulurakennukseen, joka oli rakennettu työmaalla. Laskennan elinkaariarvio otti huomioon kaikki rakennuksen elinkaaren päävaiheet: tuotevaihe (materiaalien hankinta, kuljetus ja tuotevalmistus), rakentaminen (moduulien kuljetus työmaalle ja asennukset), käyttövaihe (korjaus ja käytönaikainen energiankulutus) sekä elinkaaren päätösvaihe (rakennuksien purku, jätteen kuljetus, käsittely ja poltto).</p> <p>Moduulirakenteinen koulu pärjäsikin tarkastelussa hyvin. Tarkastelujakson aikana (40 vuotta), koulurakennusta siirrettiin 4 kertaa. Vaikka siirrot aiheuttavatkin lisää ympäristökuormaa tavanomaisen rakennustavan nähdessä, siirrettävän koulun elinkaaren aikainen hiilijalanjälki oli vain vähän isompi (3 %) kuin vertailtavana ollut koulu.</p> <p>Rakennuksen käytönaikainen hiilijalanjälki riippuu rakennuksen energiatehokkuustasosta, sekä käytetyn energian tuotannon tavasta. Kun koulun lämmitystavaksi valitaan ilma-vesi lämpöpumppu, koulun elinkaarenaikainen hiilijalanjälki oli jopa ~50% pienempi verrattuna kouluun, joka oli kytketty kaukolämpöverkkoon. Tässä tarkastelussa kaukolämmön hiilijalanjälki perustui suomalaiseseen keskiarvo-kaukolämpötuotantoon, mutta jos kaukolämpö olisi tuotettu täysin uusiutuvilla polttoaineilla, koulurakennuksen elinkaaren aikainen hiilijalanjälki olisi ollut paljon pienempi, kun tässä esitetty.</p> <p>Tarkastelussa ei tehty vertailua paikalla rakennetun koulun lisätilan tarpeesta, mahdollisuudesta hyödyntää vanhan koulun tiloja, eikä siitä, joudutaanko osaa vanhan koulun tiloista purkamaan ja rakentamaan uudestaan. Molemmat koulut purettiin 40 vuoden käyttöajan jälkeen. Purkamisen jälkeen purkujäte kuljetettiin loppusijoitukseen tai käsittelyyn. Niistä puumateriaalit murskattiin polttoaineeksi, betoni murskattiin hyödynnettäväksi pohjarakentamiseen ja muut purkujätteet siirrettiin kaatopaikalle. Elinkaaren päätösvaihe oli puumateriaalien poltto polttolaitoksessa. Tuloksen mukaan siirrettävän koulurakennuksen elinkaariaikainen hiilijalanjälki on noin 637 tonnia ja paikalla rakennetun koulun hiilijalanjälki on noin 618 tonnia.</p>	
Espoo, 14.11.2018 Laatija  Sirje Vares, erikoistutkija	Hyväksyjä  Jari Shemeikka, tiimipäällikkö
VTT:n yhteystiedot Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy, PL 1000, 02044 VTT	
Jakelu (asiakkaat ja VTT)	
<i>VTT:n nimen käyttäminen mainonnassa tai tämän raportin osittainen julkaiseminen on sallittu vain Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy:ltä saadun kirjallisen luvan perusteella.</i>	

Sisällysluettelo

Sisällysluettelo.....	2
1. Tausta ja tavoite.....	3
2. Menetelmä /toteutus	3
2.1 Rakennuksen elinkaaren vaiheet.....	3
2.2 Rakennustiedot.....	5
2.3 Vertailut	6
3. Tulokset	11
3.1 Rakennuksen tuotevaihe (A1-A3)	11
3.2 Rakennuksen rakentamisen vaihe (A4 ja A5)	11
3.3 Rakennuksen käyttövaihe (B3, B4 ja B6).....	12
3.4 Rakennuksen päätösvaihe (C1 - C4)	12
4. Johtopäätökset ja yhteenveto.....	13

1. Tausta ja tavoite

Perinteinen rakennustapa on tyypillisesti elementti- ja/tai paikalla rakentaminen. Elementtirakentamisessa elementtien esivalmistusaste voi olla pieni tai suuri. Betonirakentamisessa on tyypillistä tehdasvalmisteisten ontelolaattojen ja seinäelementtien käyttö. Puurakentamisessa esivalmistusaste voi olla suurelementti (seinä) tai moduulirakentaminen, jossa talossa käytetyt moduulit (tilaratkaisut) rakennetaan valmiiksi talotehtaalla. Tällöin työmaalle jää toteutettavaksi vain moduulien asennus. Näin rakennusprosessi työmaalla on lyhyt.

Kun tilamoduulit rakennetaan valvotuissa olosuhteissa ja säältä suojassa, rakentamisen laatu saattaa lisäksi olla parempaa kuin työmaalla rakentamisen tapauksessa. Teollinen tehdasrakentaminen on myös tehokas tapaa jätteiden määrien vähentämiseksi, kun materiaalien tilaukset toteutetaan vähimmäismäärien mukaisesti. Myös hukkapalojen ja muiden ylimääräisinä tilattujen materiaalien hyödyntäminen on paremmin hallittavissa.

Kuntien- ja kaupunkiosien asukasmäärät saattavat väliaikaisesti muuttua, jonka tuloksena alueen koulujen tilantarve kasvaa. Moduulirakenteinen siirrettävä koulu voi olla ratkaisu siihen. Siirrettävät tilamoduulit voidaan tuoda täydentävänä rakennuksena paikalle ja kun tilantarve jälleen muuttuu, ja täydentävää tilaa ei enää tarvita, moduulit voidaan siirtää seuraavaan käyttöpaikkaan. Näin olleen välttää turhista väistötiloista ja rakennuksien purkuprosesseista. Toisaalta moduulien rakentaminen, rakennuspaikan valmistelu ja moduulien siirrot kuluttavat energiaa ja aiheuttavat vaikutuksia ympäristöön.

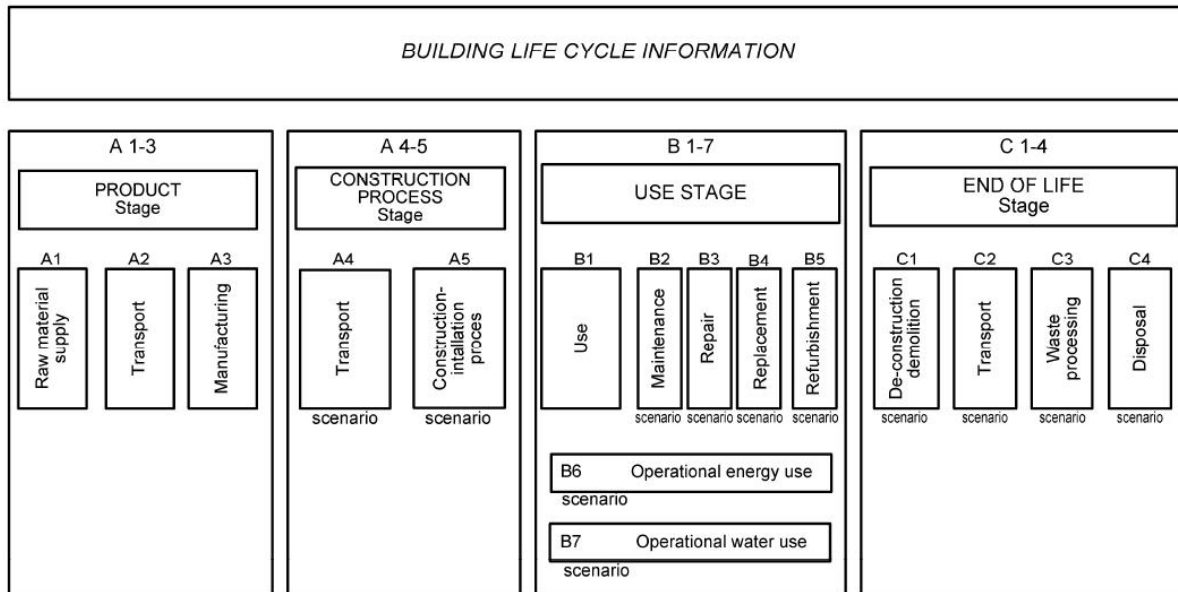
Työn tavoitteena oli selvittää siirrettävän koulurakennuksen hiilijalanjälki verrattuna rakennukseen, joka on toteutettu perinteiseen tapaan työmaalla. Hiilijalanjälki osoittaa kuinka paljon nämä kaksi erilaista rakennustapa aiheuttavat kasvihuonekaasuja elinkaarensa aikana.

2. Menetelmä /toteutus

2.1 Rakennuksen elinkaaren vaiheet

Elinkaariarvio (LCA) on menetelmä, jolla arvioidaan tuotteen tai toiminnan vaikutuksia ympäristöön koko sen elinkaaren ajalta (EN 15978:2011)¹. Rakennuksen elinkaari järjestelmärajoiden mukaan jakaantuu neljään päävaiheeseen: tuotevaihe (A1-A3), rakentamisen vaihe (A4-A5), käyttövaihe (B1-B7) ja elinkaaren päätösvaihe (C1-C4) Kuva 1. Lisäksi elinkaariarvioon voidaan sisällyttää myös rakennuksen elinkaaren ulkopuolella oleva vaihe D, jossa voidaan ilmoittaa materiaalien kierrätyksen, uudelleenkäytön, energiahyödyntämisen potentiaaliset korvausvaikutukset.

¹ EN 15978:2011 Sustainability of construction works — Assessment of environmental performance of buildings — Calculation method



Kuva 1. Rakennuksen elinkaaren vaiheet (EN 15978:2011).

Moduulirakentamisen elinkaaren hiilijalanjälki selvitettiin Parmaco Oy:n valmistaman siirtokelpoisen koulukonseptin osalta (MR) ja tulosta verrattiin koulurakennukseen, joka oli rakennettu kokonaan työmaalla (PR).

Hiilijalanjälki laskettiin hiilidioksidiekvivalenttiarvona (CO₂e). Laskennassa otetaan mukaan kaikki tärkeämmät kasvihuonekaasupäästöt, kuten esimerkiksi fossiilinen hiilidioksidi (CO₂), metaani (CH₄) ja typpioksiduuli (N₂O). Lopuksi päästöt painotetaan heidän potentiaalisen kasvihuonekaasuvaikutuksen mukaan (IPCC 2007²) ja tulos lasketaan yhteen:

$$\text{CO}_2\text{e} = \text{CO}_2 + 25 \cdot \text{CH}_4 + 298 \cdot \text{N}_2\text{O} \dots$$

Hiilijalanjälki pitää sisällä vain fossiilisia päästöjä, puutuotteiden hiilisisältö on jätetty tarkastelun ulkopuolelle. Selvitykseen on valittu seuraavat rakennuksen elinkaaren vaiheet:

- tuotevaihe - sisältää raaka-aineiden hankinnat (A1), kuljetukset (A2) ja rakennusmateriaalien valmistuksen (A3),
- rakennusvaihe - sisältää rakennusmateriaalien kuljettaminen työmaalle (A4) ja rakennuksen rakentamisprosessin (A5)
- käyttövaihe 40 vuoden aikana sisältää elinkaarenaikaiset materiaalien korjaamiset (B3) ja uusimiset (B4), sekä rakennuksen energiankäytön (B6).
- elinkaaren päätösvaihe sisältää rakennuksen purkamisen (C1), purkuvaiheen kuljetukset (C2), purkujätteen käsittelyn (C3) ja purkujätteen loppusijoituksen (C4).

² Forster, P., V. Ramaswamy, P. Artaxo, T. Berntsen, R. Betts, D.W. Fahey, J. Haywood, J. Lean, D.C. Lowe, G. Myhre, J. Nganga, R. Prinn, G. Raga, M. Schulz and R. Van Dorland (2007) "Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing". In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

2.2 Rakennustiedot

Kaikki tarvittavat lähtötiedot, koskien siirrettävän koulurakennuksen materiaalien käyttöä (tuotevaihe), rakentamista (rakennusvaihe), rakennuksen energiankulutusta ja käyttöiän aikaisia osien uusimisiä (käyttövaihe) perustuvat Parmaco Oy:n siirrettävän koulukonseptin tietoihin (Kuva 2, Taulukko 1).



Kuva 2. Parmaco Oy:n siirrettävä koulurakennusesimerkki.

Taulukko 1. Siirrettävä moduulirakenteinen koulu.

	Arvo	Yksikkö
Kerrosala	600	m ²
Huoneistoala	527,5	m ²
Tilavuus	2290	m ³
Kerroskorkeus	3,82	m
Ulkoseinä (seinä + päätykolmiot)	423 (393 + 30)	m ²
Alapohja	589	m ²
Yläpohja	589	m ²
Väliseinät yhteensä	594	m ²
Vesikatto + sisääntulokatos	706,7 + 10	m ²
Ikkunat, 38 kpl	60	m ²
Ovet, 20 kpl	46	m ²
Kattoristikot	14,4	m ³
MR perustus: betonipaalu, joka muodostaa perustuksen sekä kaksi kerrosta puupiiruja)	21+ 4,3	m ³

2.3 Vertailut

Oletuksena on, että rakennuksen käyttöikä on pitkä, moduulirakennus voidaan käyttöiän aikana siirtää toiseen paikkaan palvelemaan myös seuraava käyttäjää, kun taas kiinteästi paikalleen rakennettu rakennus pysyy koko tarkasteluiän samassa paikassa. Käyttöiän päätyttyä rakennukset puretaan.

Tässä laskennalliseksi tarkasteluiäksi valittiin 40 vuotta. Tämän aikana moduulirakenteinen koulu siirrettiin 4 kertaa uudelle rakennuspaikalle. Perinteisellä rakennustavalla rakennettu koulu rakennettiin vain kerran ja pysyi koko tarkasteluajan samalla paikalla. Tarkastelujana päätyttyä molemmat koulut purettiin. Rakennuksien vertailussa käytetyt tiedot esitetään taulukossa, Taulukko 2.

Taulukko 2. Siirrettävä moduulirakenteinen koulu vs. paikalla rakennettu koulun ominaisuudet.

<i>Koulurakennus</i>	<i>Moduulirakennus (MR)</i>	<i>Paikalla rakennettu rakennus (PR)</i>
Koko	600 m ²	600 m ²
Rakennusten tarkasteluaika	4 x 10 vuotta = 40 vuotta	40 vuotta
Alapohja	Puualapohja	Maanvarainen betonilaatta
Perustus	Betonipaalut muodostavat perustuksen sekä sokkelin. Rakenteeseen kuluu 21 m ³ betonia + 4,3 m ³ puupiiruja	Betonianturat sekä sokkeli. Rakenteeseen kuuluu yhteensä 27 m ³ betonia
Rakennuksen vaippa	Puupaneeli, peltikatto	Puupaneeli, peltikatto
Rakentamisen hukka	Rakentaminen mittatilaustavarasta, hukat pieniä (Puutavaran hukka 5%, villan hukka 2%, levyjen hukka 5%)	Rakentaminen pitkistä tavarasta, hukat isompia (Puutavaran hukka 10 %, Villan hukka 15%, Levyjen hukka 5%)
Materiaalien kuljetus	- Materiaalien kuljetus talotehtaalle kuljetusmatka 200 km . - Moduulien kuljetus rakennustyömaalle 300 km	Materiaalien kuljetus rakennustyömaalle, kuljetusmatka 200 km.
Rakennusmoduulien siirto	4 kertaa/40 v	0 kertaa/ 40 v
Rakentamisen energiankulutus	Talotehtaan energiankulutus moduulien valmistuksessa ja työmaan asennuksen energiankulutus	Rakentamisen energiankulutus rakennustyömaalla
Rakennuksen elinkaaren päätösvaihe	-Purkuvaiheen energiankulutus Parmaco Oy:n arvio. -Materiaalien kuljetus jatkokäsittelyyn tai kaatopaikalle 25 km -Materiaalien jatkojalostus hyödyntämiseksi (puutuotteiden haketus, betonin murskaus). - Jätteen käsittelyvaiheen päästöt (hakkeen poltto)	-Purkuvaiheen energiankulutus Parmaco Oy:n arvio. -Materiaalien kuljetus jatkokäsittelyyn tai kaatopaikalle 25 km. -Materiaalien jatkojalostus hyödyntämiseksi (puutuotteiden haketus, betonin murskaus). - Jätteen käsittelyvaiheen päästö (hakkeen poltto)

Rakennusmateriaalien lähtötiedot

Rakennuksien materiaalikulutuksien inventaario toteutettiin Parmaco OY:ltä saatujen rakenneratkaisujen perusteella. Materiaalien hiilijalanjälkiarvoina käytettiin pääasiassa VTT:n Ilmari tietokantaa, materiaalien ympäristöselosteita ja yleisesti alalla käytettyjä tietokantoja/kirjallisuustietoja.

Taulukko 3. Koulurakennuksen materiaalmäärät ja loppukäsittelyskenaario (määrät hukalliset).

Materiaalit	MR koulu kg/rakennus	PR koulu kg/rakennus	Käsittely elinkaaren päätyttyä
Muovimatto	2 463	2 463	kaatopaikka
Lastulevy	8 572	0	poltto
Kertopuu	9 581	0	poltto
Lämmöneriste, kivivilla	13 880	13 530	kaatopaikka
Lämmöneriste, EPS	2 062	2 062	kaatopaikka
Sementtikuitulevy	30 057	0	murskaus
Puu	35 959	36 525	poltto
Pintakäsittelymateriaali	360	159	poltto
Kipsilevy	37 730	37 730	kaatopaikka
Höyrysulku, aluskate	199	443	kaatopaikka
Muovipinnoitettu pelti	4 077	4 077	keräykseen
Bitumikermi	74	74	kaatopaikka
Vaneri	63	63	poltto
Kovalevy	2 068	2 068	poltto
Ikkunat	2 472	2 472	kaatopaikka
Ovet	1 164	1 164	kaatopaikka
Kattokannattajat	6 480	6 480	poltto
Betoni	50 400	183 111	murskaus
Tasaushiekka ja murske	318 060	339 264	kaatopaikalle
Yhteensä	525 720	631 684	

Materiaalikuljetuksien lähtötiedot

Kuljetuksien hiilijalanjätkilaskennassa on käytetty LIPASTO:n yksikköpäästötietokantaa, jonka on toteuttanut Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy yhdessä rahoittajien kanssa (Liikenteen turvallisuusvirasto Trafi ja Liikennevirasto). Oletuksena on, että kuljetus tapahtuu tavarakuljetuksena maantiellä ja autotyypinä käytetään puoliperävaunuyhdistelmää (kokonaismassa 40 tonnia, kantavuus 25 tonnia). Auton päästötason EURO-luokka oletettiin olevan vuoden 2016 keskimääräinen taso Suomessa.

Oletuksena paikalla rakentamisen osalta on, että materiaalit kuljetetaan moduulirakentamisen tehtaalle sekä rakennustyömaalle täysinä kuormina ja materiaalien keskimääräinen kuljetusmatka on 200 km.

Moduulien kuljetus rakennuspaikalle tapahtuu 50 % täyttöasteella. 40 vuoden aikana moduuleita siirrettiin 4 kertaa. Kuljetusmatka oletettiin olevan 300 km, joten yhteensä neljää siirtoa varten yksi auto kulkee 1200 km (4 x 300 = 1 200 km). Yhteensä koko koulun siirtoa varten (moduulit ja perustuspaalut), tarvitaan 15 autoa moduulikuljetuksille ja 2 autollista betonipaalujen ja muiden tarvikkeiden kuljetuksille. Näin olleen 40 vuoden aikana moduuleita kuljetetaan yhteensä 20 400 km (1200 x 17 = 20 400 km).

Rakennusvaiheen lähtötiedot

Moduulirakenteisen koulun osalta rakennusvaiheen kuuluu moduulien valmistus tehtaalla sekä moduulien installaatio rakennustyömaalla.

Tehtaan sähkön- ja kaukolämmön kulutustiedot saatiin Parmaco Oy:ltä ja nämä koskivat vuoden 2017 toimintaa. Tehdas sijaitsee Pyhäjoen kunnassa, jossa 90% lämmöstä tuotetaan hakepoltolla ja 10 % kevyttä polttoöljyä käyttäen. Pyhäjoen lämmöntuotannon hiilijalanjälkilukua ei ollut saatavana, joten tässä laskennassa käytettiin lämmöntuotannolle keskimääräistä suomalaisen kaukolämmön hiilijalanjälkiarvoa (vuoden 2017 tuotannon mukaan ja siinä vain osa on tuotettu puupohjaisella polttoaineella).

Rakennustyömaan energiankulutus perustuu kolmen rakennustyömaan energialaskuihin toteutuneista sähkönkulutuksista. Työmaan energiankulutus riippuu osittain myös siitä mille kaudelle rakentamisen työ osuu. Arviossa yksi kohde rakennettiin kevättalvella ja kaksi kesällä, tässä tutkimuksessa oletettiin että 75% rakentamisesta osuu kevättalville ja 25 % rakentamisesta kesälle. Näin olleen moduulien asentamisen energiankulutus on 7,5 kWh/rakennus-m². 40 vuoden aikana moduulirakenteinen koulu siirretään 4 kertaa eri paikkakunnalle ja sen mukaan tarvitaan myös 4 kertaa moduulien asennusta.

Paikalla rakentamisen osalta koko rakentaminen tapahtuu työmaalla. Rakennustyömaan energiankulutustiedot perustuvat myös erään kohteen työmaan energialaskuihin (kirjallisuustieto³). Kohteista valittiin puurakentamisen kohde, jonka energiakulutus oli 10 kWh/rakennus-m³, josta 70% kuluu lämpönä ja 30 % sähkönä.

Koulujen käytönaikaisen energiankulutuksen lähtötiedot

Käytönaikaisen energiankulutuksen vertailussa (moduulirakentaminen / paikalla rakentaminen) oletuksena on, että rakennuksien käytönaikainen energiankulutus on samaa. Esimerkkinä oleva koulurakennus liitetään kaukolämpöverkkoon, jossa on vesikierteinen patterijärjestelmä.

Moduulirakenteisen koulun energiatuottotavan vertailuna käytettiin perinteisen kaukolämpökytkennän lisäksi ilmavesilämpöpumppu vaihtoehtoa.

Koulurakennuksen energiankulutuksen simulointi perustui Aleksanteri Kenan koulun E-luvun energiakulutuskantaan (siirtokelpoinen koulurakennus, valmistusvuosi 2018)⁴. Taulukko 4 esittää simuloinnissa käytetyn koulurakennuksen rakenteiden U-arvot.

Taulukko 4. Rakenteiden U-arvot.

	U-arvo W/m ² K
Ulkoseinä	0,17
Yläpohja	0,09
Alapohja	0,17
Ikkunat	1,0
Ulko-ovet	1,0

Energialaskennan mukaan koulu tarvitsee vuosittain ostoenergiana sähköä 37 kWh/m² ja kaukolämpöä 115 kWh/m² (energiankulutus yhteensä 152 kWh/m², vuosi). Koulun E-luvun vaatimustaso on 105 kWh_E/m²vuosi, laskennan mukaan tämä alittuu, ja on 103 kWh_E/m²vuosi.

Kun energiankulutussimuloinnissa käytettiin tapausta, jossa koulurakennuksen lämmitys järjestetään vesi-ilmalämpöpumpun (VILP) avulla, ostoenergiana on vain sähkö, jota tarvitaan

³ Vares, S., Häkkinen, T., Vainio, T. 2017. Rakentamisen hiilivarasto. VTT:n asiakasraportti VTT-CR-04958/25.9.2017

⁴ Laskentatyökalu: www.laskentapalvelut.fi, versio 1.4 (24.1.2018)

71 kWh/m² vuodessa. Tässä energiankulutussimulointi perustuu Akaa Hirvialhon koulun E-luvun laskentaan (siirtokelpoinen koulurakennus, valmistusvuosi 2018)⁵.

Sähkön- ja lämmön hiilijalanjälki perustuu VTT:n laskentaan, jossa lähtötietona käytetty Suomen energiateollisuuden kolmen vuoden tilastotietoa tuntitasotuotannosta (2011 - 2013) ja tuntitason aiheuttamaa hiilijalanjälkeä (Energiateollisuuden tilastossa ilmoitettu vain CO₂ päästö). Kolmen vuoden tietoja käytettiin vuositason laskennassa, jotta säävaihtelun- sekä energiatuotannon vaihtelun erot vuosien välillä olisivat vähäisiä. Näin olleen keskimääräisen sähkön hiilijalanjälki on 0,146 kg CO₂/kWh ja lämmön 0,149 kg CO₂/kWh.

Elinkaaren päätösvaiheen lähtötiedot

Elinkaaren päätyttyä koulut puretaan. Purkutyö tehdään kaivinkoneella, jolla myös purkujäte lajitellaan vaihtolavoille. Lisäksi tontti tasoitetaan purun yhteydessä. Tässä laskennassa on arvioitu, että koulun purku moduulirakenteisen koulun osalta kestää yhden työviikon (40 h). Kun kaivinkoneen (20 t) polttoaineen kulutus on 15 litra tunnissa, polttoainetta kuluu purun aikana 600 litra (40 h x 15 l/h = 600 litra). Paikalla rakennetussa koulussa käytettiin enemmän betonia perustuksissa ja sokkelissa, näin olleen koulun purku oletettiin kestävän 2 päivää enemmän. Sen mukaan koulun purussa kulutetaan polttoöljyä 840 litraa (56 x 15 l/h = 840 litra).

Kaivinkoneen hiilijalanjälki perustuu VTT Lipasto yksikköpäästötietokantaan (päivitetty 6.7.2017). Näin olleen pyöräalustaisen kaivinkoneen (88 W ja kuormitusaste 0,32) polttoöljyn kulutuksen hiilijalanjälki on 2,67 kg CO₂e/litra.

Koulurakennuksen päätösvaiheen jälkeen materiaalit käsitellään Taulukko 3 esitettyjen skenaarioitten mukaan. Oletuksena on, että jätteen käsittelypaikka sijaitsee 25 km päässä purkupaikasta.

Jätteiden kuljetus tapahtuu 4 akselisella kuorma-autolla, jonka kantavuus on n. 20 tonnia. Purkamisessa syntyy useampaa lajia jätettä joista kaikista ei saa täysiä kuormia ja toisaalta osa jätteestä on niin kevyttä, ettei kuorma-auton kantavuus tule vastaan täysillä kuormilla ajettaessa. Laskennassa on käytetty arviota, että yhdessä kuormassa kulkee keskimäärin noin 13 tonnia jätettä. Tämän mukaan 291 285 kg (purkujätteen kuljetukseen tulee 22 kuormaa (291,285 tonni / 13 tonni /kuorma = 22 kuormaa).

Jätteen käsittelyvaihe sisältää puupohjaisen jätteen haketuksen polttoa varten ja betonin murskauksen. Haketuksen päästötieto perustuu arvioon haketuksen energiankulutuksesta. Tässä laskennassa käytettiin energiankulutuslukua 8,5 MJ/puumateriaali-m³. Tästä laskettuna saadaan, että energiaa kulutetaan 0,00513 kWh/kg (8,5 MJ /3,6/ 460 kg= 0,00513 kWh/m³). Ottamalla huomioon, että haketus tehdään polttoainesyötteisellä koneella, jossa polttoaineen päästö on 261 g/kWh (Polttoaineluokitus 2018), saadaan että murskauksen/haketuksen CO₂ päästö on 0,0013 kg CO₂ /kg.

Betonimurskauksen CO₂ päästönä käytettiin murskeen valmistuksen päästöä 1,78 kg CO₂/ kg. Tämä perustuu Tiehallinnon selvityksiin 22/2006⁶.

Jätteen käsittelyssä puuperäisen hakkeen polton päästöt perustuvat sahatavaran valmistuksen ympäristöselosteen elinkaarivaiheen C4, jossa otettiin huomioon puun poltto CHP polttolaitoksessa, jonka hyötysuhde oli 75%⁷.

⁵ Laskentatyökalu: www.laskentapalvelut.fi, versio 1.4 (14.6.2016)

⁶ Korkiala-Tanttu, L., Tenhunen, J., Eskola, P., Häkkinen, T., Hiltunen, M-R. ja Tuominen, A. 2006. Väylärakentamisen ympäristövaikutukset ja ekoindikaattorit; Ehdotus arviointijärjestelmäksi.

⁷ EPD, Environmental Product Declaration, Classic Sawn Timber by Stora Enso.

3. Tulokset

3.1 Rakennuksen tuotevaihe (A1-A3)

Rakennuksen elinkaarivaihe A1-A3 on rakennustuotteiden valmistusvaihe, joka kattaa raaka-aineiden hankinnan, kuljetukset ja tuotteen valmistuksen. Tuloksen mukaan siirrettävän koulun rakennusmateriaalien valmistusvaihe (A1 - A3) on vähän isompi kuin paikalla rakennettavan koulun materiaalien valmistusvaihe. (Taulukko 5).

Taulukko 5. Rakennustuotteiden valmistusvaiheen hiilijalanjälki (Rakennus MR on moduulirakenteinen koulu ja PR on paikalla rakennettu koulu).

Rakenne	Tyyppi	m ²	MR koulu, kgCO ₂ e/m ²	PR koulu, kgCO ₂ e/m ²	MR koulu kgCO ₂ e	PR koulu kgCO ₂ e
Alapohja	AP	589	65	56	38 337	32 726
Yläpohja	YP	569	18	19	10 460	10 737
Yläpohja	YP (tekn. tila)	20	23	24	462	472
Vesikatto	Vesikatto	707	17	17	12 311	12 320
Sisääntulokatos	Vesikatto	10	19	19	187	186
Ulkoseinä	US	423	20	21	8 484	9 018
Väliseinä	VS (VE1)	308	16	17	4 990	5 192
Väliseinä	VS (VS tekn. tila, EI30)	32	19	20	616	637
Väliseinä	VS (VD1)	163	23	23	3 688	3 802
Väliseinä	VS (VD2, tekn. tila)	11	15	16	169	177
Väliseinä	VS (VS1)	80	12	13	981	1 007
Ikkunat	Ikkunat	60	114	114	6 840	6 840
Ovet	Ovet	46	35	35	1 610	1 610
Ristikot	Ristikot (14,4 m ³)				475	475
Perustus					7 117	8 937
Yhteensä					96 728	94 137

3.2 Rakennuksen rakentamisen vaihe (A4 ja A5)

Elinkaarivaiheet A4 ja A5 kuuluvat rakennuksen rakentamisvaiheeseen. Vaihe A4 sisältää rakennusmateriaalien ja rakenteiden kuljetuksen työmaalle. Tässä selvityksessä Moduulirakennuksen osalta kuljetusprosessi sisältää kaksi vaiheetta, ensiksi materiaalit kuljetetaan tehtaaseen (jossa rakennusmoduulit valmistetaan) ja sen jälkeen koulun moduulit kuljetetaan rakennuspaikalle. Paikalla rakennettavan koulun tapauksessa kaikki rakennusmateriaalit ja osat kuljetetaan suoraan työmaalle. Moduulirakentamisen osalta koulun moduuleita kuljetetaan 40 vuoden aikana 4 kertaa eri paikkakunnille.

Elinkaarivaihe A5 on rakennusvaihe, johon kuuluu moduulirakentamisen osalta moduulien valmistus tehtaalla ja installaatio rakennustyömaalla. 40 vuoden aikana moduulirakenteinen koulu siirretään 4 eri paikkakunnalle ja sen mukaan tarvitaan myös 4 x moduulien installaatiota. Paikalla rakentamisen osalta vaihe sisältää vain rakentamisen työmaalla.

Taulukko 6. Rakentamisvaiheen hiilijalanjälki (A4 ja A5) (Rakennus MR on moduulirakenteinen koulu ja PR on paikalla rakennettu koulu).

Elinkaaren vaihe	MR	PR
	kg CO ₂ e/ 40 vuotta	kg CO ₂ e/ 40 vuotta
A4, rakennusmateriaalien kuljetus tehtaalle tai työmaalle	3 995	4 802
A4, moduulien siirto rakennuspaikalle, 40 vuoden aikana tehdään 4 siirto	16 055	0
A5, moduulien rakentaminen tehtaalla ja asennus työmaalla (asennus tehdään 4 kertaa)	5 559	0
A5, rakennuksen rakentaminen työmaalla	0	3 364
Yhteensä	25 608	8 166

3.3 Rakennuksen käyttövaihe (B3, B4 ja B6)

Rakennuksen käyttövaiheeseen sisältyy myös kunnossapito, korjaus, osien vaihto sekä energian ja veden kulutus. Tässä laskennassa oletettiin, että koulujen 40 vuoden käyttöaikana isoja korjauksia ei tehdä, ainoastaan ikkunat vaihdetaan kerran ja julkisivut maalataan 3 kertaa.

Rakennuksen käytön aikana eniten päästöjä aiheutuu rakennuksen 40 vuoden lämmityksestä. Perusoletuksena oli, että koulut on liitetty kaukolämpöverkkoon. Tarkasteltavien koulujen energiatehokkuus oli samaa, joten rakennustavalla ei ole vaikutusta energiankulutukseen.

Rakennuksen käytönaikaista hiilijalanjälkeä voidaan pienentää huomattavasti kun kouluun asennetaan ilmavesilämpöpumppu (VILP) (Taulukko 7).

Taulukko 7. Käyttövaiheen hiilijalanjälki (elinkaaren vaiheet B3, B4 ja B6).

Koulu sekä lämmitysjärjestelmä	MR tai PR koulu Kaukolämpö, kg CO ₂ e/ 40 vuotta	MR koulu, VILP kg CO ₂ e/ 40 vuotta
Huoltomaalaus (B3)	999	999
Ikkunoitten vaihto (B4)	6 840	6 840
Sähkönkulutus (B6)	121 122 (3 028 kg CO ₂ e/ vuosi)	231 071 (5 777 kg CO ₂ / vuosi)
Lämmönkulutus (B6)	381 994 (9 550 kg CO ₂ / vuosi)	0 (0 kg CO ₂ /vuosi)
Yhteensä	510 955	238 911

3.4 Rakennuksen päätösvaihe (C1 - C4)

Rakennuksen päätösvaiheeseen sisältyy rakennuksen purkaminen (C1), purkumateriaalien kuljetukset (C2), purkujätteen käsittely (C3) sekä kaatopaikkasijoitus (C4).

Tässä laskennassa on otettu huomioon, että rakennuksen purun jälkeen puumateriaalit lähetetään kierrätykseen, jossa niistä tehdään haketta energiatehokkuudelle, villat, kipsilevyt siirretään kaatopaikalle, betonijäte siirretään murskaamoon, jossa tehdään betonimursketta hyödynnettäväksi maarakennuksessa (C2 ja C3). Betonimurskeen hyödyntämisessä

oletuksena on sen ympäristö- ja tekninen kelpoisuus (haitta-aineeton, täyttää vaatimukset jätteiden hyödyntämisestä maarakentamisessa).

Purkumateriaalien loppusijoitus (C4) ottaa huomioon jätteen käsittelystä syntyvät päästöt ja tässä nämä ovat puuperäisten materiaalien poltto polttolaitoksessa. Tulokset elinkaaren päätösvaiheen osalta esitetään taulukossa, Taulukko 3.

Taulukko 8. Rakennuksen päätösvaihe (C1 - C4) (MR-koulu on moduulirakenteinen koulu ja PR-koulu on paikalla rakennettu koulu).

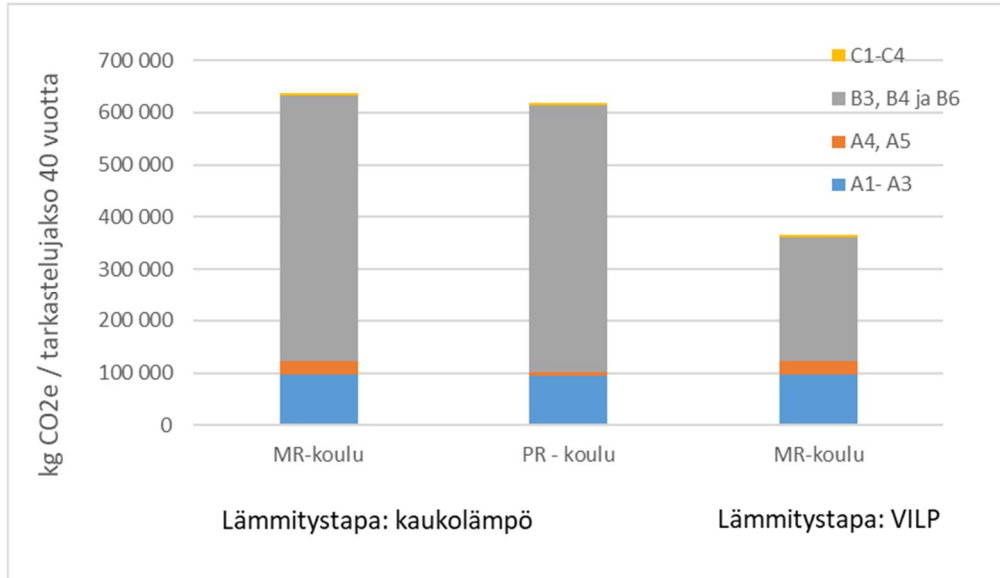
Elinkaaren vaihe	MR-koulu kg CO ₂ e	PR-koulu kg CO ₂ e
C1, rakennuksen purku	1603	2 244
C2, purkumateriaalien ja hukkamateriaalien kuljetus kaatopaikalle ja jatkojalostukseen	526	632
C3, purkumateriaalin käsittely	228	387
C4, puumateriaalin poltto	2126	1526
Yhteensä	4 482	4 789

4. Johtopäätökset ja yhteenveto

Moduulirakentamisen elinkaarenaikainen hiilijalanjälki selvitettiin Parmaco Oy:n siirrettävän koulun esimerkkilaskentana. Vertailuna käytettiin koulurakennusta, joka rakennetaan työmaalla. Koulujen tarkastelujakso laskennassa oli 40 vuotta. Siinä aikana moduulirakenteinen koulu rakennettiin tehtaassa ja siirrettiin työmaalle 4 kertaa. Käyttöään jälkeen koulut purettiin ja materiaalit jatko käsiteltiin loppulista sijoitusta varten. Tulokset esitetään taulukossa, Taulukko 9, Kuva 3.

Taulukko 9. Rakennuksien elinkaariperusteinen hiilijalanjälki (Rakennus MR on moduulirakenteinen koulu ja PR on paikalla rakennettu koulu).

	A1- A3	A4, A5	B3, B4 ja B6	C1 - C4	Yhteensä	osuus
Rakennus	kg CO ₂ e/ 40 vuotta	kg CO ₂ e/ 40 vuotta	kg CO ₂ e/ 40 vuotta	kg CO ₂ e/ 40 vuotta	kg CO ₂ e/ 40 vuotta	%
MR-koulu, Kaukolämpö	96 728	25 608	510 955	4 482	637 773	100 %
PR-koulu, Kaukolämpö	94 137	8 166	510 955	4 789	618 047	97 %
MR - koulu, VILP	91 255	25 608	238 911	4 482	365 729	57 %



Kuva 3. Koulurakennuksien elinkaarenaikainen hiilijalanjälki. MR: siirtokelpoinen moduulirakenteinen koulu, PR: perinteisellä tavalla rakennettu koulu (Koulut liitetty kaukolämpöverkkoon tai lämmityksenä on ilma-vesi lämpöpumppu, VILP).

Laskennan mukaan moduulirakenteinen koulu pärjäsi tarkastelussa hyvin. Tarkastelujakson aikana (40 vuotta), koulurakennusta siirrettiin 4 kertaa ja vaikka siirrot aiheuttavatkin lisää ympäristökuormaa tavanomaisen rakennustavan nähden, siirrettävän koulun elinkaaren aikainen hiilijalanjälki oli vain 3 % isompi kuin vertailtavana ollut koulun (Taulukko 9).

Siirrettävä koulu rakennetaan kahdessa vaiheessa, aluksi moduulit rakennetaan talotehtaalla ja lopulta moduulit asennetaan työmaalla. Materiaalien tehokas käyttö tehtaalla johtaa pienempiin jättemateriaalimääriin, kun rakentaminen työmaalla. Toisaalta, rakentaminen sisätiloissa kuluttaa enemmän energiaa, johtuen tehdasrakennuksen jatkuvasta lämmityksestä. Työmaan energiankulutus sen sijaan riippuu osittain myös siitä, mille kaudelle rakentamisen työ osuu. Kesän aikana rakennustyömaan energiankulutus on paljon pienempi kuin talviaikana johtuen lämmitystarpeesta. Rakentaminen tilamoduuleista (moduulien rakentaminen tehtaassa ja asennukset työmaalla) aiheutti 2 tonnia isomman hiilijalanjäljen paikalla rakentamisen nähden, kun oletuksena oli, että 75% rakennetaan kevättalvella ja 25% kesällä.

Rakennuksen käytönaikainen hiilijalanjälki riippuu rakennuksen energiatehokkuustasosta, sekä käytetyn energian tuotannon tavasta. Kun koulun lämmitystavaksi valitaan ilma-vesi lämpöpumppu, koulun elinkaarenaikainen hiilijalanjälki oli jopa ~50% pienempi verrattuna kouluun, joka oli kytketty kaukolämpöverkkoon. Tässä tarkastelussa kaukolämmön hiilijalanjälki perustui suomalaiseseen keskiarvo-kaukolämpötuotantoon, mutta jos kaukolämpö olisi tuotettu täysin uusiutuvilla polttoaineilla, koulurakennuksen elinkaaren aikainen hiilijalanjälki olisi ollut paljon pienempi, kun tässä esitetty.

Tarkastelussa ei tehty vertailua paikalla rakennetun koulun lisätilan tarpeesta, mahdollisuudesta hyödyntää vanhan koulun tiloja, eikä siitä, joudutaanko osaa vanhan koulun tiloista purkamaan ja rakentamaan uudestaan. Molemmat koulut purettiin 40 vuoden käyttöajan jälkeen. Purkamisen jälkeen purkujäte kuljetettiin loppusijoitukseen tai käsittelyyn, jossa puumateriaalit murskattiin polttoaineeksi, betoni murskattiin hyödynnettäväksi infra rakentamisessa ja muut siirrettiin kaatopaikalle. Elinkaaren päätösvaihe oli puumateriaalien poltto polttolaitoksessa. Tuloksen mukaan siirrettävän koulurakennuksen elinkaariaikainen hiilijalanjälki on noin 637 tonnia ja paikalla rakennetun koulun hiilijalanjälki on noin 618 tonnia. Tämä on vain 3 % isompi kuin perinteisellä tavalla rakennettu koulu.

