



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

# **URAKOISIJAN VAIKUTUSMAHDOLLISUUDET RAKENNUSHANKKEEN HIILIJALANJÄLKEEN**

Juuso Ojala

RAKENNUS- JA YHDYSKUNTATEKNIikka

Diplomityö

Tammikuu 2024

# TIIVISTELMÄ

Urakoitsijan vaikutusmahdollisuudet rakennuksen hiilijalanjälkeen

Juuso Ojala

Oulun yliopisto, Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka tutkinto-ohjelma

Diplomityö 2023, 66 s. + 1 liitettä

Työn ohjaaja yliopistolla: Hannu Lahtinen

Diplomityön tavoitteena oli tutkia rakennusurakoitsijan päätäntävällän alla olevia keinoja rakennettavan rakennuksen hiilijalanjäljen vähentämiseksi. Tunnistaa rakennusvaiheen merkittävimmät tekijät kasvihuonekaasujen muodostumisessa, ja esittää tavanomaisiin toimintatapoihin vähäpäästöisiä vaihtoehtoja. Lisäksi tavoitteena oli tarkastella kriittisesti Ympäristöministeriön rakennuksen vähähiilisyiden arviointimenetelmässä hyödynnettävien rakentamisvaiheen ominaispäästöjen taulukkoarvoja.

Tyypillisen rakennuksen tuotevaiheen tarkastelussa todettiin, että betoni- ja teräsrakenteet ovat suurimmat yksittäiset tekijät hiilijalanjäljen muodostumisessa. Työssä tutkittiin vaihtoehtoisia, vähäpäästöisiä tuoteratkaisuja, joilla saavutetaan merkittävä päästövähennys tuotevaiheessa. Työmaakuljetuksissa tarkasteltiin tavanomaisesti muodostuvan hiilijalanjäljen tekijöitä, ja esitettiin lyhyempien kuljetusmatkojen ja ajoneuvojen polttoaineratkaisujen hyödyntämisestä saatavia ympäristöhyötyjä. Työmaatoimintojen energiankulutuksen tutkinnassa aineistona hyödynnettiin usean rakennuksen työmaalla mitattua kuukausitasoista energiankulutusta ja laskettiin näiden avulla työmaatoiminnoista muodostuva hiilijalanjälki. Työssä tutkittiin sekä uudisrakennuksia, että peruskorjauskohteita.

Erään kohteen tuntitasoisesta energiankulutuksesta huomattiin, että työmaalla kuluva sähköenergia vaihtelee vain vähän aktiivisen työajan, ja sen ulkopuolisen ajan välillä. Ulkolämpötilan todettiin vaikuttavan merkittävästi tarvittavan lämmitysenergian, tyypillisesti kaukolämmön kulutukseen. Tutkimuksessa huomattiin, että tutkittujen rakennustyyppien ja kohteiden välillä työmaan ominaisenergiankulutus ja tästä laskettava ominaispäästö ei vaihtelee kovinkaan merkittävästi ja on tyypillisesti välillä

30–35 kgCO<sub>2</sub>e/nm<sup>2</sup>. Lisäksi havaittiin, että peruskorjauskohteiden työmaavaiheessa muodostuva hiilijalanjälki on vain hieman uudisrakennusten tasoa vähäisempi.

Lisäksi työssä toteutettiin Raksystems Oy:n käyttöön laskentatyökalu työmaakuljetuksien ja työmaatoimintojen kohdekohtaiseen arvioimiseen.

*Asiasanat: hiilijalanjälki, rakentamisvaihe, ominaispäästö*

# ABSTRACT

Ways for a contractor to influence the carbon footprint of a construction project

Juuso Ojala

University of Oulu, Degree Programme of Civil Engineering

Master's thesis 2023, 66 pp. + 1 Appendixes

Supervisor at the university: Hannu Lahtinen

The aim of this thesis was to examine the means under the control of a construction contractor to reduce the carbon footprint of their construction project by identifying the most significant factors in the formation of greenhouse gases during the construction phase, and to present low-emission alternatives for used building materials. In addition, the aim of the thesis was to critically examine the average carbon footprint table values the construction phase given in the evaluation method of the Ministry of the Environment of Finland.

In the examination of the product phase of a typical building, it was found that concrete and steel structures are the largest factors in formation of the carbon footprint. Alternative low-emission product solutions were investigated in the thesis, which achieve a significant emission reduction in the product phase. Greenhouse gas emissions formed in transportation of building materials were also investigated. The environmental benefits of shorter transportation distances and the use of low-emission fuels for the vehicles were presented. In the investigation of the energy consumption in the construction site, the monthly energy consumption was measured at the site of several buildings. The measured data was used to calculate the carbon footprint for each project. Both new buildings and renovation sites were examined in this thesis.

From the hourly energy consumption of one site, it was noticed that the electrical energy consumed on the construction site varied only slightly between active work hours and the time there were no personnel on the site. The outdoor temperature was found to greatly influence the consumption of required heating, heating being typically district heating. In the study it was noticed that between the investigated building types and studied sites there was no significant difference in energy used per square meter.

With this information the emission factor of studied projects was able to be calculated to range between 30 – 35 kgCO<sub>2</sub>e/m<sup>2</sup>. Additionally, it was found that the carbon footprint created during the construction phase of renovation projects is only slightly lower than that of a new building.

In addition, during the thesis a calculation tool was implemented for the use of Raksystems Oy for evaluating the carbon footprint formed in construction phase.

*Key words: carbon footprint, construction phase, emission factor*

# ALKUSANAT

Tämä diplomityö on kirjoitettu Raksystems Insinööritoimiston toimeksiannosta. Diplomityön tarkoituksena oli tutkia rakennusurakoitsijan vaikutusmahdollisuuksia rakennushankkeen hiilijalanjälkeen sekä esittää rakennustyömaiden todellisesta energiankulutuksesta muodostuvaa kasvihuonekaasujen päästömäärää ja tutkia näiden vertautuvuutta Ympäristöministeriön laskentamenetelmän mukaisiin taulukkoarvoihin. Diplomityön ideointi ja toteutus aloitettiin alkuvuodesta 2022 ja työ valmistui tammikuussa 2024.

Haluan kiittää työpaikaltani Timo Rintalaa diplomityön ohjauksesta ja elinkaariasiantuntijaksi kouluttamisesta. Timon ideoiman diplomityön kirjoitus- ja tutkimustyö on ollut mielenkiintoista ja ammatillista osaamistani kehittävä. Haluan myös kiittää yliopiston ohjaajaani Hannu Lahtista. Ilman Hannun akateemisen kirjoittamisen avustusta ja kuulusteluita diplomityön etenemisestä työ tuskin olisi valmistunut kahdessa vuodessa.

Lopuksi kiitokset perheelleni työn etenemisen kannustamisesta, ystäväilleni aikuiseksi kasvamisen jakamisesta ja ikimuistoisista kokemuksista opintojen ohessa ja sen ulkopuolella. Lisäksi haluan kiittää avopuolisoani Linneaa arjen pyörittämisestä ja tuesta pitkän diplomityön toteutuksen aikana.

Oulu 24.1.2024



Juuso Ojala

# SISÄLLYSLUETTELO

1 JOHDANTO.....	7
2 TEOREETTINEN TAUSTA.....	9
2.1 Hiilineutraalisuuden askeleet.....	9
2.1.1 GHG Protocol.....	9
2.1.2 Sitoumus 2050.....	10
3 RAKENTAMISEN HIILIJALANJÄLKI.....	11
3.1 Rakennuksen elinkaaren hiilijalanjälki.....	11
3.1.1 YM-menetelmä.....	12
3.2 Kuljetukset työmaalle A4.....	13
3.3 Työmaatoiminnot A5.....	13
3.4 Rakentamisvaiheessa käytettävä energia.....	14
3.4.1 Kaukolämpö.....	15
3.4.2 Nestekaasu.....	15
3.4.3 Sähkö.....	16
3.4.4 Polttoöljy.....	17
3.4.5 Maalämpö.....	17
3.4.6 Asuinkerrostalon työmaatoimintojen hiilijalanjälki aiempien energiatutkimustulosten perusteella.....	18
4 VAIKUTUSMAHDOLLISUUDET TUOTEVAIHEESSA.....	22
4.1 Paikallavalurakenteiden päästövähennysmahdollisuudet.....	24
4.2 Betonivalmisisat.....	25
4.3 Teräsosat.....	27
4.4 Muut tuotevaiheen päästövähennysmahdollisuudet.....	28
5 VAIKUTUSMAHDOLLISUUDET TYÖMAAN KULJETUKSISSA.....	31
5.1 Hiilijalanjäljen muodostuminen kuljetuksissa.....	31
5.2 Vähähiilisten polttoaineiden hyödyntäminen.....	33
5.3 Työmaan kuljetusten vähähiilisyyden potentiaali.....	34
6 VAIKUTUSMAHDOLLISUUDET TYÖMAAN ENERGIANKULUTUKSESSA.....	35
6.1 Toteutunut tuntitasoinen energiankulutus.....	35
6.2 Toteutunut energiankulutus opetusrakennushankkeissa.....	39
6.2.1 Koulu A.....	40
6.2.2 Koulu B.....	40
6.2.3 Koulu C.....	41
6.2.4 Päiväkoti A.....	42

6.2.5 Opetusrakennusten rakentamisvaiheen ominaispäästö .....	43
6.3 Toteutunut energiankulutus asuinkerrostalokohteessa .....	45
6.4 Toteutunut energiankulutus toimisto-/tuotantorakennuksessa .....	46
6.5 Toteutunut energiankulutus peruskorjaushankkeissa .....	48
6.5.1 Peruskorjauskohde A .....	49
6.5.2 Peruskorjauskohde B .....	50
6.5.3 Peruskorjauskohde C .....	51
6.5.4 Peruskorjauskohteiden rakentamisvaiheen ominaispäästö .....	52
6.6 Sähköenergian tuottaminen työmaalla .....	53
6.6.1 Generaattorit .....	53
6.6.2 Aurinkosähkö .....	54
6.6.3 Bioenergia .....	54
6.7 YM-menetelmän ulkopuoliset vaikutusmahdollisuudet .....	55
6.7.1 Vihreän energian hankinta .....	55
6.7.2 Päästöjen kompensointi .....	56
7 JOHTOPÄÄTÖKSET .....	57
8 YHTEENVETO .....	59
LÄHTEET .....	62

#### LIITTEET:

Liite 1. Raksystems Oy:lle diplomityön ohessa tuotetun rakentamisvaiheen hiilijalanjäljen arviointityökalun tulostesivut

## MERKINNÄT JA LYHENTEET

CO <sub>2</sub>	Hiilidioksidi
CO <sub>2</sub> e	Hiilidioksidiekvivalentti
GWP	Global Warming Potential
kWh	Kilowattitunti
nm <sup>2</sup>	Rakennuksen lämmitetty nettoala
SYKE	Suomen ympäristökeskus
YM	Ympäristöministeriö

# 1 JOHDANTO

Ilmastonmuutoksen ymmärryksen syventyessä keinot sen hallitsemiseksi ovat suuressa kysynnässä. Ilmaston lämpenemistä edistävien tekijöiden tunnistaminen ja tutkiminen onkin ollut ympäristötutkimuksen polttavin ja johdonmukaisin haara tällä vuosituhannella. Ilmakehän epäluonnollisen nopea kasvihuonekaasupitoisuuden kasvu on seuraus ihmisen teollistumisen jälkeisestä toiminnasta. Merkittävimmäksi kasvihuonekaasuksi ilmastonmuutoksen kannalta on noussut hiilidioksidi (CO<sub>2</sub>) – eikä ihme, sillä fossiilisen materiaalin hyödyntäminen energiantuotannossa on ollut elämisen kulmakivi vuosisatoja. Hiilidioksidia vapautuu ilmakehään hiiltä sisältävän materiaalin polton yhteydessä. Itsenäisen kokonaisuuden tuottama hiilidioksidimäärä tunnetaan sen hiilijalanjälkenä.

Kullekin tuotteelle ja palvelulle voidaan määrittää hiilijalanjälki, joka kuvaa sen tuottamisen, kuluttamisen ja hävittämisen yhteenlaskettua hiilidioksidimäärää. Hiilijalanjälki ilmaisee päästömäärän massayksikkönä; mitä suurempi massa on, sitä enemmän päästöjä kyseinen tuote tuottaa elinkaarensa aikana (Fortum 2020). Hiilijalanjälki on hyvä ja yksinkertainen tapa jakaa CO<sub>2</sub>-päästöt hallittavimpiin kokonaisuuksiin, joiden suuruuteen jokainen voi vaikuttaa.

Kohteen hiilijalanjäljen määrittämisessä tutkitaan tavanomaisesti sen hiilidioksidiekvivalentin määrää – tarkasteltavan kokonaisuuden koosta riippuen kiloina tai tonneina (kgCO<sub>2</sub>e/tCO<sub>2</sub>e). Hiilidioksidiekvivalentilla tarkoitetaan kasvihuonekaasujen yhteismittaa. Kasvihuonekaasujen ilmastoja lämmittävä vaikutus vaihtelee eri kaasujen välillä. Hallitustenvälinen ilmastopaneeli IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) julkaisee kasvihuonekaasujen ilmaston lämpenemispotentiaaliarvon GWP (Global Warming Potential), jonka avulla kasvihuonekaasun ilmastovaikutusta voidaan arvioida suhteessa hiilidioksidiin. Hiilidioksidin GWP arvoksi on asetettu 1, johon muiden kasvihuonekaasujen arvoja vertaamalla voidaan määrittää kasvihuonekaasujen yhteisvaikutus. (OpenCO<sub>2</sub>.net 2023).

Tuotteen tai palvelun muodostamaa hiilidioksidiekvivalenttia tutkitaan tavanomaisesti sen ominaispäästön kautta. Ominaispäästöllä tarkoitetaan tarkasteltavan kokonaisuuden CO<sub>2</sub>e-päästömäärää sille luontaisella yksiköllä jaettuna. Tällaisia yksiköitä ovat esimerkiksi energialle kgCO<sub>2</sub>e/kWh, paikallavalubetonille kgCO<sub>2</sub>e/m<sup>3</sup>, laatoille

kgCO<sub>2</sub>e/m<sup>2</sup> sekä pilareille ja palkeille kgCO<sub>2</sub>e/jm. Ominaispäästöihin perustuva tarkastelu mahdollistaa saman suureen tulosten vertailun ja näin paremman kuvan siitä, minkä tuotteen tai palvelun hiilijalanjälki on suuri tai pieni. Rakennushankkeissa tämä arvo ilmaistaan lisäksi jaettuna kohteen nettopinta-alalla hankkeiden välisen vertailtavuuden mahdollistamiseksi. Rakennuksen lämmitetyllä nettoalalla (nm<sup>2</sup>) tarkoitetaan rakennuksen ulkoseinien sisäpinnan mukaan laskettua rakennuksen pinta-alaa.

Uuden rakennuksen rakentamisvaiheen hiilijalanjälki lasketaan tyypillisesti Ympäristöministeriön tai Suomen Ympäristökeskuksen tarjoamalla taulukkoarvoilla. Taulukkoarvot ovat suuntaa antavia lukuja tavanomaisen uudiskohteen rakentamisvaihteessa syntyvälle hiilijalanjäljelle, joiden muuttujina toimii rakennustyyppi. Rakentamisvaiheen hiilijalanjälki on näiden taulukkoarvojen mukaisessa arvioinnissa noin 7–9 prosenttia rakennuksen koko elinkaaren hiilijalanjäljestä. Todellisuudessa rakentamisvaiheen hiilijalanjälki on usean tekijän määrittämä kokonaisuus. Merkittävimpiä tekijöitä rakennustyyppin lisäksi rakennuspaikalle tuotavien materiaalien kuljetusmatka, rakennuspaikkakohtainen maatoiden määrä, rakentamisvaiheen kesto sekä käytettävät työmaalla ja kuljetuksissa käytettävät energiamuodot.

Diplomityön tarkoituksena on selvittää urakoitsijan vaikutusmahdollisuudet rakennuksen elinkaaren hiilijalanjälkeen sekä, esittää rakentamisvaihteelle todenmukaisempi päästömäärä mitattavissa olevien parametrien avulla ja luoda laskentamalli, jolla voidaan todeta hankkeesta riippumatta yksilökohtainen hiilijalanjälki rakentamisvaiheessa, johon voidaan vaikuttaa työmaalla tehtävillä ratkaisulla. Todenmukainen rakentamisvaiheen hiilijalanjälkilaskenta, johon työmaan toiminnoilla on vaikutusta, kannustaisi vähäpäästöisten ratkaisujen toteuttamista. Lisäksi työssä toteutetaan Raksystems Oy:n käyttöön laskentatyökalu työmaakuljetuksien ja työmaatoimintojen kohdekohtaiseen arvioimiseen.

## 2 TEOREETTINEN TAUSTA

Rakennusten elinkaaren ympäristövaikutukset ovat herättäneet Suomessa kiinnostusta kasvavassa määrin. Rakennusten osuus Suomen CO<sub>2</sub>-päästöistä on noin 40 %, joka merkittävänä kokonaisuutena on avainasemassa ilmastopolitiikan murroksessa. Analysoimalla rakennusten elinkaaren päästöjä pyritään saavuttamaan parempi käsitys niiden päästöistä ja päästölähteistä. Elinkaarianalyysien avulla voidaan tunnistaa päästöjen määrät ja aiheuttajat sekä niiden osuudet elinkaaren eri vaiheissa.

Ympäristön lämpeneminen on kasvattanut vähäpäästöisten ratkaisujen innovointia. Kasvihuonekaasujen päästölähteiden tunnistaminen on tärkeä osa tässä prosessissa, sillä nämä tunnistamalla voidaan tärkeimpiin tuottajiin löytää tehokkaimmat ratkaisut. Hiilijalanjälkilaskennassa kasvihuonekaasut, kuten hiilidioksidi (CO<sub>2</sub>), metaani (CH<sub>4</sub>) sekä typpioksiduuli (N<sub>2</sub>O), ilmaistaan kootusti termillä hiilidioksidiekvivalentti (CO<sub>2</sub>e).

Sekä kunnallisella että yksityisellä sektorilla on suuri vastuu kasvihuonekaasupäästöjen vähennystalkoissa. Suuren säästöpotentiaalin myötä näihin kohdistuu Suomessa merkittävä paine positiivisten ympäristötoimien tekemiseksi. Yksi tärkeimmistä tavoitteista on hiilineutraaliuuden tavoittelu.

### 2.1 Hiilineutraalisuuden askeleet

Hiilineutraalisuudella tarkoitetaan tasapainoa tuotetun hiilidioksidin ja ilmakehästä sidotun hiilidioksidin välillä (European Parliament 2022). Periaatteellisesti tämä pätee minkäkokoiseen hakkeeseen tahansa ja käsittää hiilidioksidin lisäksi kaikki muutkin kasvihuonepäästöt. Hiilineutraaliuuden saavuttamiseen on olemassa useita standardeja, protokolleja ja sopimuksia. Kansainvälisesti kasvihuonepäästöjen laskentaa ohjaa ISO 14064-standardisarja.

#### 2.1.1 GHG Protocol

Eräs maailmanlaajuisesti tunnistettu ja merkittävä kasvihuonekaasujen määrää ja hallintaa ohjaava standardi on Greenhouse Gas protocol (GHG protocol). GHG protocol on usean eri sektorin edustajan liitto, jonka tarkoituksena on luoda ja tarjota standardoidut askelmerkit yrityksille näiden arvoketjun tuottaman hiilijalanjäljen

vaikutuksen ymmärtämiseksi, jonka perusteella voitaisiin keskittyä haitallisimpien toimintatapojen tuottamien päästöjen vähentämiseen. Standardi ja tämän tuoma ohjeistus on hyödynnettävissä usealla sektorilla ja toimialalla, mutta vaikuttaa voimakkaimmin yritysmaailmassa. (PlanA.Earth 2023). GHG Protocol tarjoaa kasvihuonekaasujen lähteiden tunnistamisen tueksi kolme tarkastelulaajuutta.

Ensimmäisen tarkastelulaajuuden päästöt liittyvät tutkittavan kokonaisuuden omistamien ja hallinnoimien resurssien tuottamiin kasvihuonekaasuihin. Toisin sanoen nämä ovat tarkasteltavan kokonaisuuden suoraa ilmakehään päästämät kasvihuonekaasut. Näitä ovat esimerkiksi rakennustyömaalla käytettävät polttoaineet tai organisaation omistamat fossiilista polttoainetta käyttävät voimalaitokset. (PlanA.Earth 2023).

Toinen tarkastelulaajuus on epäsuorat kasvihuonekaasujen päästölähteet. Näitä ovat GHG Protokollan mukaan ostettavan energian tuotannosta muodostuvat päästöt. Tähän kokonaisuuteen kuuluvat käytetyn sähkön, höyryn, lämmityksen ja viilentämisen tuottamisesta aiheutuvat päästöt. (Huckins S. 2019).

Kolmas ja viimeinen tarkastelulaajuus käsittää toiminnan ala- ja ylävirroista muodostuvat epäsuorat kasvihuonekaasut. Esimerkkinä alavirran päästöistä on yrityksen myymien tuotteiden käyttämisestä aiheutuva hiilijalanjälki, ylävirran päästöistä puolestaan yrityksen ostamat tavara ja palvelut. (Huckins S. 2019).

### **2.1.2 Sitoumus 2050**

Päästöttömät työmaat – Kestävien hankintojen green deal -sopimus on ympäristöministeriön, Helsingin, Turun, Espoon ja Vantaan kaupunkien sekä Senaatti-kiinteistöjen allekirjoittama sopimus, jonka tarkoituksena on vähentää työmailla syntyviä päästöjä. Sopimuksen tavoitteena on, että Senaatti-kiinteistöjen sekä mukana olevien kaupunkien rakennustyömailla ei käytettäisi fossiiliperäisiä polttoaineita vuoden 2025 loppuun mennessä. Tämän lisäksi työmaan kuljetuksista sekä työkoneista vähintään 50 % tulee toimia sähköllä, vedyllä tai biokaasulla vuoden 2030 loppuun mennessä. (Sitoumus2050 2023).

## **3 RAKENTAMISEN HIILIJALANJÄLKI**

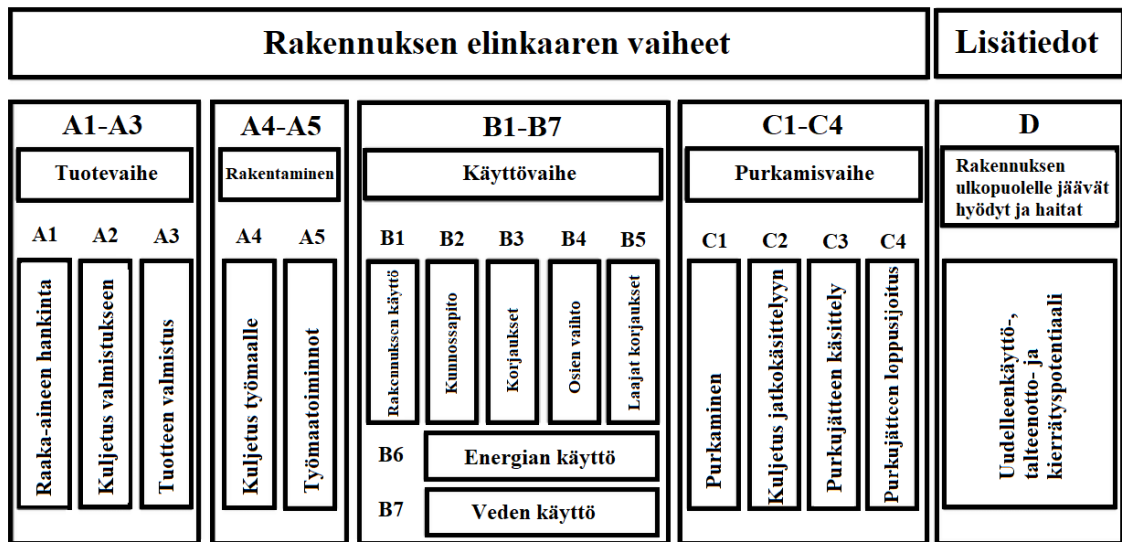
Hiilijalanjätkilaskentaa tehdään toimintojemme ympäristökuorman paremman ymmärryksen takia. Hiilijalanjätkilaskenta mahdollistaa tuotteen, palvelun, yrityksen, aktiviteetin tai muun kokonaisuuden aiheuttamien kasvihuonekaasumäärien selvittämisen sekä näiden vertailun. Hiilijalanjätkilaskennan avulla voidaan tunnistaa merkittävimmät kasvihuonekaasulähteet, ja näihin vaikuttamalla mahdollistetaan tehokas päästövähennysstrategia.

### **3.1 Rakennuksen elinkaaren hiilijalanjätki**

Rakennusten elinkaaren hiilijalanjätkilaskenta perustuu kansainvälisiin standardeihin. Useat eurooppalaiset hiilijalanjätken arviointimenetelmät perustuvat Euroopan komission laatimaan Level(s)-menetelmään. Level(s) pohjautuu eurooppalaisiin kestävän rakentamisen standardeihin, esimerkiksi EN 15643-sarja, EN 15804 ja EN 15978.

Rakennuksen hiilijalanjätken määrittämisen tueksi on olemassa useita laskentamenetelmiä. Erot niiden välillä liittyvät laskennan laajuuteen, tarkastelujakson pituuteen sekä ostoenergian ominaispäästöihin rakennuksen elinkaaren aikana. Suomalaisessa rakennusten hiilijalanjätken laskennassa on vakiintunut Ympäristöministeriön vähähiilisyyden arviointimenetelmä, eli niin sanottu YM-menetelmä.

Rakennuksen elinkaari jaotellaan EN 15643-2-standardissa kolmeen pääkategoriaan (A-C), joiden lisäksi ilmoitetaan elinkaaren ulkopuolisten tekijöiden vaikutukset kategoriassa D. Lisäksi pääkategoriat jaetaan näiden alakategorioiden päästöjen paremman ymmärryksen vuoksi. Rakennuksen elinkaaren vaiheet esitetään Kuvassa 1.



Kuva 1. Rakennuksen elinkaaren vaiheet kestävän rakentamisen standardin (SFS-EN 15643-2, 2011) mukaisesti.

Laskentamenetelmästä riippumatta elinkaaren merkittävimmät päästöt muodostuvat materiaalien tuotevaiheissa (A1-A3) sekä käytönaikaisesta energiankulutuksessa (B6). Näiden vaiheiden yhteisvaikutus rakennuksen hiilijalanjäljessä on kohteesta riippuen noin 75–85 %.

### 3.1.1 YM-menetelmä

Ympäristöministeriön vuonna 2017 julkaisema vähähiilisuuden tiekartta ja sitä täydentävä rakennuksen vähähiilisuuden arviointimenetelmä vuodelta 2019 ovat toimineet kivijalkana suomalaisessa hiilijalanjälkilaskennassa muutaman vuoden ajan. Menetelmä pohjautuu Euroopan komission laatimaan Level(s)-menetelmään, jonka perustana toimivat kestävästä rakentamisesta koskevat eurokoodien standardit. (Ympäristöministeriö 2019).

YM-menetelmän erityispiirteisiin kuuluvat ostoenergian vuosittainen päästövähennäminen sekä taulukkoarvojen hyödyntäminen työmaavaiheen sekä talotekniikan päästöjen määrittämisessä. Lisäksi Kuvan 1 mukaisista rakennuksen elinkaaren vaihteista YM-menetelmä huomioi käyttövaiheessa ainoastaan rakennustuotteiden vaihdot sekä energian käytön. Ympäristöministeriön laskentamenetelmässä rakennuksen elinkaari lasketaan 50 vuoden ajanjaksolle.

### 3.2 Kuljetukset työmaalle A4

Työmaakuljetuksista syntyy YM-menetelmän mukaisesti uudiskohteesta riippumatta 27 kgCO<sub>2</sub>/nm<sup>2</sup> päästöt (Ympäristöministeriö 2019). YM-menetelmän A4 taulukkoarvo perustuu Tarja Häkkisen (2021) kirjoittamaan ja Suomen ympäristökeskuksen julkaisemaan taustaraporttiin rakennusmateriaalien kuljetuksesta. Raportissa käsitellään keskimääräistä rakennusmateriaalin kuljetusmatkaa Suomessa, tyypillisimpiä kuljetettavia kantavia rakennusmateriaaleja, niiden massoja pinta-alaa kohden sekä kuljetusmuodon tuottamia päästöjä ja kuljetusmuodon kuormausastetta (Häkkinen T. 2021). Työmaalle tuotavan rakennusmateriaalin kuljetuksista muodostuva hiilijalanjälki on YM-menetelmän mukaisella taulukkoarvolla laskettuna noin 3 prosenttia rakennuksen elinkaaren kokonaishiilijalanjäljestä.

Keskimääräiseksi rakennuksen neliöpainoksi Häkkinen ehdottaa 2500 kg/m<sup>2</sup>, edestakaiseksi kuljetusmatkaksi 102 km, yhdistelmäkuorma-auton kuormausasteeksi 37,5 % (75 % toimitusmatkalla ja 0 % paluumatkalla), moottoritieajon ja taajama-ajon suhteeksi 9/1 sekä näiden ominaispäästöiksi 0,0995 gCO<sub>2</sub>e/km ja 0,1617 gCO<sub>2</sub>e/km (Häkkinen T. 2021). Työmaakuljetuksien taulukkoarvo on laskettu Kaavassa 1.

$$2500 \frac{kg}{m^2} * 102km * \left(0,0995 \frac{gCO_2e}{km} * 0,9 + 0,1617 \frac{gCO_2e}{km} * 0,1\right) = 26,958 \frac{kgCO_2e}{m^2} \quad (1)$$

### 3.3 Työmaatoiminnot A5

Työmaatoimintojen hiilijalanjälki muodostuvat pääosin rakennustyömaan ostoenergian ja polttoaineiden kasvihuonekaasujen pohjalta. Energiankulutuksen vähentäminen on noussut keskeiseen osaan päästöjen ja varsinkin kustannusten vähentämiseksi Euroopassa vallitsevan energiakriisin keskellä. Suomen pitkäkestoinen talvikausi luo suuren energiantarpeen työmailla, minkä vuoksi rakentamisvaihe kuluttaa rakennuksen elinkaareen nähden lyhyessä ajassa suuren määrän energiaa ja tuottaa paljon päästöjä. Valtaosa työmaan energiankulutustarpeesta muodostuu lämmityksestä, jolla varmistetaan betonivalujen optimaalinen kovettuminen, rakenteiden kuivuminen sekä hyvät työskentelyolosuhteet. Lämmityksen lisäksi työmaalla tarvitaan valaistusta ja työkoneita, jotka omalta osaltaan kasvattavat rakentamisvaiheen kokonaisenergiakulutusta ja tämän hiilijalanjälkeä.

Suomen ympäristökeskuksen ylläpitämän ja YM-menetelmässä hyödynnettävän rakentamisen tietokannan mukaisesti työmaatoimintojen päästömäärä määräytyy uudiskohteelle elinkaariarvioinneissa taulukkoarvoista rakennustyyppiakohtaisesti Taulukossa 1 esitettävällä tavalla. Taulukkoarvot perustuvat todellisten rakennuskohteilta kerättyihin tuloksiin asuinkerrostalojen työmaavaiheen kasvihuonekaasumääristä, jonka jälkeen tätä lukua on skaalattu opetusrakennuksille ja toimistoille perustuen eri rakennustyyppien nettoalan ja tilavuuden suhteeseen (CO<sub>2</sub>data 2022). Rakennustyyppistä ja kohteesta riippuen uudiskohteen työmaatoimintojen hiilijalanjälki on noin 5–8 prosenttia rakennuksen elinkaareen hiilijalanjäljestä.

Taulukko 1. SYKE:n mukaiset työmaatoimintojen ominaispäästöt eri rakennustyypeille.

Asuinkerrostalot	46 kgCO <sub>2</sub> e/nm <sup>2</sup>
Opetusrakennukset	60 kgCO <sub>2</sub> e/nm <sup>2</sup>
Toimistorakennukset	78 kgCO <sub>2</sub> e/nm <sup>2</sup>
Maa- ja pohjarakentaminen	7 kgCO <sub>2</sub> e/nm <sup>2</sup>
Stabilointi	0,04 kgCO <sub>2</sub> e/kg (stabilointiainetta)

### 3.4 Rakentamisvaiheessa käytettävä energia

Rakentamisvaiheessa lämmittämiseen käytetään kaukolämpöä, lämmitys sähköä, nestekaasua, polttoöljyä sekä uusimpana maalämpöä. Lämmitysratkaisun valinnassa on kriittistä tuntee työmaan tarpeet, ja tavanomaisesti lämmitysratkaisu sisältää useamman yhtäaikaisten lämmitystavan parhaan kokonaisuuden aikaansaamiseksi (Ramirent 2019). Taulukossa 2 esitetään työmaalla käytettävien energiamuotojen päästökertoimet. Sähkön ja kaukolämmön ominaispäästöarvot perustuvat SYKE:n mukaisiin vuoden 2022 lukuihin (CO<sub>2</sub>data). Nestekaasun ja polttoöljyn ominaispäästöt esitetään Kappaleissa 3.4.2 ja 3.4.4.

Taulukko 2. Yhteenveto työmaalla käytettävien energiamuotojen päästökertoimista.

Kaukolämpö	0,1404 kgCO <sub>2</sub> /kWh
Sähkö	0,1402 kgCO <sub>2</sub> /kWh
Nestekaasu	0,2336 kgCO <sub>2</sub> /kWh
Polttoöljy	0,2796 kgCO <sub>2</sub> /kWh
Maalämpö	0,0467 kgCO <sub>2</sub> /kWh

### 3.4.1 Kaukolämpö

Rakentamisvaiheessa kaukolämpöä hyödynnetään tavanomaisesti runkovaiheen lopulla ja sisätyövaiheen alkupuolella. Kaukolämpöpuhaltimet kierrättävät lämmintä vettä radiaattorin läpi, minkä jälkeen puhallin levittää lämmitetyn ilman lämmitettävään tilaan. Puhaltimet voidaan liittää joko kohteen omaan kiertovesilämmitysjärjestelmään tai erilliseen lämmönlähteeseen (Hämäläinen J. 2012).

Kaukolämpö on edullinen lämmönlähde. Puhaltimissa on tehokas lämmönjako eikä lämmitysprosessi tuota ilmaan epäpuhtauksia, minkä ansiosta kaukolämpö on myös hiilijalanjälkeä tarkastellessa hyvä vaihtoehto. Parhaimmillaan kaukolämpö on, kun puhaltimissa voidaan hyödyntää rakennuksen omaa lämmitysjärjestelmää. Kaukolämpöpuhaltimien teho ei kuitenkaan riitä runkovaiheessa olevien kohteiden lämmittämiseen, minkä vuoksi sitä ei voida hyödyntää läpi rakentamisvaiheen. Lisäksi kaukolämmön käyttö sisältää vesivahinkoriskin ja vaatii jatkuvaa ylläpitoa. (Ramirent 2019).

Kaukolämmön päästökertoimen oletetaan YM-menetelmässä laskevan ilmastopoliittisten toimien mukaisesti, joten tässä työssä todettu kaukolämmön ominaispäästö on teoreettisesti vanhentunut jo ensi vuonna. Viidenkymmenen vuoden päästä kaukolämmön päästökertoimen arvioidaan olevan vain noin 15 % nykyisestä (CO2data 2022). Vuonna 2022 ja tämän työn tarkoituksiin käytetään arvoa 0,14 kgCO<sub>2</sub>/kWh. Kaukolämmön päästökerroin vaihtelee kuitenkin merkittävästi sen tuottamistapojen välillä, mikä johtaa päästökertoimen suureen vaihteluun paikkakuntien välillä. Paikkakuntakohtaista kaukolämmön päästökeroainta ei kuitenkaan voida hyödyntää YM-menetelmän mukaisessa hiilijalanjäljen laskennassa.

### 3.4.2 Nestekaasu

Nestekaasu on propaanin (C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>) ja butaanin (C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>) seos, jota saadaan maaperän kaasuesiintymistä sekä polttoaineen ja öljynjalostuksen sivutuotteena. Nestekaasu on fossiilinen polttoaine, joka muiden hiilivetyjen tavoin vapauttaa palaessaan lämpöä, vettä ja hiilidioksidia.

Nestekaasun energiasisältö on hyvä (12,8 kWh/kg), mikä tekee siitä tilatehokkaan vaihtoehdon työmaan energiankulutustarpeisiin. Suomen ympäristökeskus (SYKE)

luokittelee kaikki fossiiliset polttoaineet yhden päästökertoimen alle, mikä on 0,306 kgCO<sub>2</sub>/kWh (CO2data 2022). Todellisuudessa fossiilisten polttoaineiden päästökertoimien välillä on eroja, ja nestekaasu on lajissaan keskimääräistä vähäpäästöisempi. Tilastokeskuksen vuoden 2022 polttoaineluokituksen mukaan nestekaasun CO<sub>2</sub> päästökerroin on 64,9 tCO<sub>2</sub>/TJ (Tilastokeskus). Megajoulen vastatessa 0,2778 kilowattituntia nestekaasun päästökertoimen arvoksi saadaan 0,234 kgCO<sub>2</sub>e/kWh.

Tilastokeskuksen mukainen arvo, 0,234 kgCO<sub>2</sub>/kWh, on 23,7 % SYKE:n esittämää arvoa pienempi ja vaikuttaa realistisemmalta arviolta nestekaasun päästökertoimeksi. Kyseessä on kuitenkin ainoastaan nestekaasun palamisesta syntyvä hiilidioksidi mikä ei sisällä koko elinkaaren päästöä, eikä muiden kasvihuonekaasujen vaikutusta.

Rakentamisvaiheessa nestekaasua käytetään runkovaiheen lämmittämiseen. Nestekaasulämmittimillä on tarpeeksi suuri lämmitysteho tarvittavien olosuhteiden takaamiseksi. Työmaalla käytetään nestekaasupuhaltimia ja -säteilijöitä. Niillä saavutetaan hyvä lämmitysteho suhteessa laitteiden kokoon, mikä mahdollistaa laitteiden sijoittamisen useaan paikkaan lämmitettävässä kohteessa. (Hämäläinen J. 2012).

### 3.4.3 Sähkö

Suurin osa työmaan käytettävästä sähköenergiasta kuluu valaistuksen ylläpitämiseen. Tarvittava valaistus on työmaalla edellytys työturvallisuuden takaamiseksi etenkin maissa, jossa valaistuksen tarve on pitkän kaamosjakson aikana lähes kokoaikaista luonnonvalon puuttuessa. Valaistuksen lisäksi suuri osa sähköenergiasta kuluu lisäkuivatukseen ja työmaakoppien energiantarpeisiin. Sähkökäyttöistä lisäkuivatusta hyödynnetään tavanomaisesti ainoastaan sisätyövaiheessa, sillä sähköverkon liitännäteho rajoittaa lämmityslaitteiden käyttöä, eikä näin sovellu runkovaiheen tarpeisiin. (Hämäläinen J. 2012)

Kuten kaukolämmössä, myös sähkön päästökertoimelle oletetaan YM-menetelmässä päästövähennelmä, joka toteutuu käsikädessä ympäristöystävällisemmän sähköntuotannon osuuden kasvaessa. Työn kirjoitusvuonna ostosähköenergialle käytetään ominaispäästöä 0,14 kgCO<sub>2</sub>/kWh.

### 3.4.4 Polttoöljy

Polttoöljy on ominaisuuksiltaan hyvin nestekaasun kaltainen, ja sitä hyödynnetään rakennustyömaalla samoihin tarkoituksiin. Sillä on erinomainen lämmityskyky ja tämän ansiosta se soveltuu hyvin runkovaiheen sekä suurten, yhtenäisten tilojen lämmittämiseen (Ramirent 2019). Polttoöljyä voidaan käyttää lisäksi työkoneiden energianlähteenä sekä generaattoreiden polttoaineena työmaalla paikallistuotetun energian valmistukseen.

Hiiliperäisenä polttoaineena polttoöljyllä on suhteellisen suuri ominaispäästökerroin. Suomen ympäristökeskus noudattaa polttoöljylle samaa päästökerrointa kuin muillekin fossiilisille polttoaineille, 0,306 kgCO<sub>2</sub>/kWh. (SYKE) Kuten nestekaasussa, polttoöljyssä on hieman tarkentamisen varaa tässä arvossa. Tilastokeskuksen vuoden 2022 polttoaineluokituksessa esitetään polttoöljylle päästökerrointa vaihteluvälillä 70,2–78,4 tCO<sub>2</sub>/TJ riippuen sen rikkipitoisuudesta (Tilastokeskus). Tästä voidaan määrittää keskimääräinen päästökerroin polttoöljyn polttamiselle:

$$\frac{70,2 \text{ tCO}_2/\text{TJ} + 78,4 \text{ tCO}_2/\text{TJ}}{2} = 74,3 \frac{\text{tCO}_2}{\text{TJ}} \rightarrow 0,267 \frac{\text{kgCO}_2}{\text{kWh}}$$

Laskennassa on huomioitu ainoastaan polttoöljyn päästökertoimen ääripäät. Tarkin laskentatulos saataisiin hyödyntämällä kunkin polttoöljyn todellinen kulutusmäärä ja näiden päästökertoimet. Tällaista dataa ei kuitenkaan ole saatavilla, joten tässä laskennassa saatu tulos on tarkkuudeltaan riittävä diplomityön tarkoitukselle.

### 3.4.5 Maalämpö

Maalämpöä saadaan hyödyntämällä maa- ja kallioperään sekä vesistöihin sitoutunutta auringon säteilemää energiaa. Lämpöpumpuilla energia siirretään lämmönlähteestä lämmitettävään kohteeseen. Maalämmön tehokkuus vaihtelee maaperän lämpötilan mukaan, minkä vuoksi maalämmön käytön hyötysuhde on parempi esimerkiksi Etelä-Suomessa kuin Pohjois-Suomessa (Suomen Kansallinen Geologian Komitea 2019).

Maalämpö itsessään on uusiutuvaa energiaa ja näin hiilivapaata. Maalämpöpumppujen käyttämä sähköenergia kuitenkin tuottaa päästöjä, joiden suuruus riippuu sähköenergian lähteestä. Pumpun käyttämä sähköenergia suhteessa maalämmöstä saatavaan energiaan

on noin 1/3 (Motiva 2022), joten tässä työssä käytetään maalämmön käytölle päästökerrointa, joka on kolmanneksen sähköenergiasta, 0,0467 kgCO<sub>2</sub>/kWh.

Kohteissa, joissa maalämmön hyödyntäminen on mahdollista, voidaan työmaatoiminnoissa syntyvää hiilijalanjälkeä vähentää merkittävästi. Rakentamisvaiheessa maalämpöä voidaan teoreettisesti hyödyntää kaikkiin lämmitystarpeisiin. Sillä voidaan korvata kaukolämmön tarve sekä nestekaasun ja polttoöljyn osuudet runkovaiheen lämmityksessä. Näin ollen päästöjä muodostuu ainoastaan sähkökulutuksesta. Kaukolämmön ja fossiilisten polttoaineiden korvaaminen maalämmöllä johtaisi sähköenergian tarpeen nousu huomioiden noin 56 prosentin päästövähennyksiin työmaatoiminnoissa.

#### **3.4.6 Asuinkerrostalon työmaatoimintojen hiilijalanjälki aiempien energiatutkimustulosten perusteella**

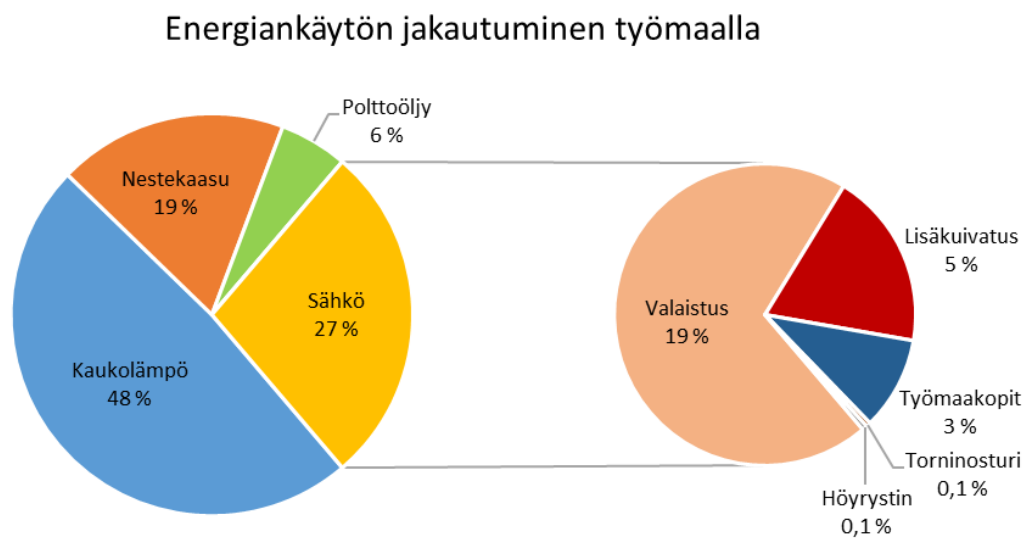
Jari Hämäläisen diplomityössä vuodelta 2012 esitetään kahden asuinkerrostalon rakentamisvaiheessa kulutetut energiamäärät. Energiankulutus energiamuotojen välillä on dokumentoitu yksityiskohtaisesti ja sellaisella tarkkuudella, että kohteiden työmaatoimintojen hiilijalanjälki voidaan määrittää. Suomen ympäristökeskuksen (SYKE) ylläpitämän CO<sub>2</sub>data-tietokannan taulukkoarvo työmaatoimintojen hiilijalanjäljelle perustuu osittain Hämäläisen tutkimustuloksiin. Laskenta on kuitenkin hieman vanhentunut, ja perustuu Hämäläisen tulosten lisäksi tutkimuksiin, joista ei ole saatavilla kulutustietoja.

Tässä kappaleessa tarkastellaan Hämäläisen energiankulutustutkimukseen pohjautuen asuinrakennusten työmaatoimintojen energiankäytön hiilijalanjälkeä. Hämäläisen tutkimustulos perustuu vuosina 2010–2012 mitattuun energiankulutukseen. Rakennusten ominaisuudet sekä energiankulutustiedot on esitetty Taulukossa 3.

Taulukko 3. Asuinrakennuksen työmaatoimintojen energiankulutus (Hämäläinen J. 2012).

Rakennus	A	B
Rakennuksen tilavuus m <sup>2</sup>	22 500	14 161
Rakennuksen Bruttoala m <sup>2</sup>	6 467	3 797
Rakennuksen nettoala m <sup>2</sup>	6 144	3 607
Kokonaiskulutus MWh	1 087	742
Kaukolämmön osuus	55 %	42 %
Kaukolämmön määrä kWh	597 850	311 640
Sähkö osuus	31 %	24 %
Sähkön määrä kWh	336 970	178 080
Nestekaasun osuus	14 %	23 %
Nestekaasun määrä kWh	152 180	170 660
Polttoöljyn osuus	0 %	11 %
Polttoöljyn määrä kWh	0	81 620

Hämäläisen tutkimissa kohteissa työmaalla käytetystä energiasta suurin osa kului rakenteiden lämmittämiseen. Tutkimuksessa korostetaan tutkimusvuosien tavanomaista kylmempiä talvia, minkä vuoksi lämmitysenergian tarve varsinkin runkovaiheessa on saattanut olla tyypillistä suurempi. Suurin osa, lähes 70 % sähköstä kului valaistukseen, lisäksi sähköenergiaa hyödynnettiin rakenteiden kuivattamiseen sekä työmaatilojen lämmittämiseen. Kuvassa 2 esitetään energiankulutuksen keskimääräinen jakautuminen tutkittujen kohteiden välillä.



Kuva 2. Asuinrakennuksen työmaatoimintojen energiankulutuksen jakautuminen (Hämäläinen J. 2012).

Lasketaan Hämäläisen tutkimustulokseen perustuen asuinrakennusten keskimääräinen hiilijalanjälki rakennuksen nettopinta-alaa kohden. Käytettävät energiamuotojen päästökertoimet on esitetty Taulukossa 1.

Kaukolämpö:

$$\left( \frac{597\,850\,kWh + 311\,640\,kWh}{2} \right) * 0,1404 \frac{kgCO_2}{kWh} = 63\,514\,kgCO_2e.$$

Sähkö:

$$\left( \frac{336\,970\,kWh + 178\,080\,kWh}{2} \right) * 0,1402 \frac{kgCO_2}{kWh} = 35\,962\,kgCO_2e.$$

Nestekaasu:

$$\left( \frac{152\,180\,kWh + 170\,660\,kWh}{2} \right) * 0,2336 \frac{kgCO_2}{kWh} = 40\,310\,kgCO_2e.$$

Polttoöljy:

$$\left( \frac{0 + 81\,620\,kWh}{2} \right) * 0,2796 \frac{kgCO_2}{kWh} = 14\,344\,kgCO_2e.$$

Yhteensä:

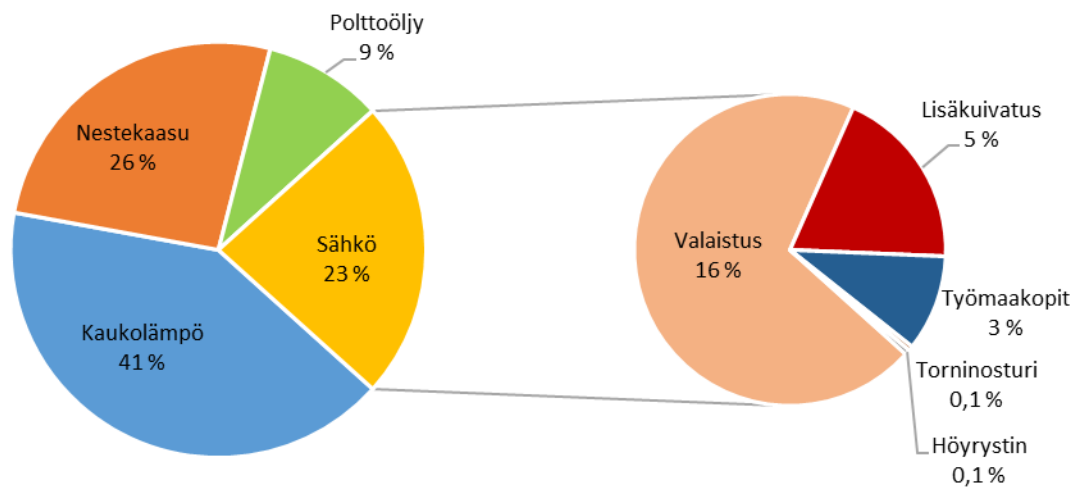
$$(63\,514 + 35\,962 + 40\,310 + 14\,344)kgCO_2e = 154\,130\,kgCO_2e.$$

Keskimääräiseksi hiilijalanjäljeksi nettopinta-alaa kohden saadaan:

$$\frac{154\,130\,kgCO_2e}{6\,144m^2 + 3\,607m^2} = 31,6 \frac{kgCO_2e}{nm^2}.$$

Tarkastelussa saatu tulos on 31 % Suomen ympäristökeskuksen asuinrakentamiselle esittämää taulukkoarvoa ( $46\,kgCO_2/nm^2$ ) matalampi. Tarkastelun otanta on todella pieni, minkä vuoksi on vaikea sanoa, kuinka lähellä laskentatulos on esimerkiksi Suomen keskimääräistä asuinrakentamisen työmaatoimintojen hiilijalanjälkeä. Lisäksi tutkimuksessa ei ole huomioitu polttomoottorikäyttöisten työmaakoneiden polttoainekulutusta, mikä luonnollisesti lisäisi kokonaispäästö määrää. Huomioiden Hämäläisen tutkimusajankohtana havaitut poikkeuksellisen kylmät olosuhteet, on todennäköistä, ettei todellinen arvo ole kuitenkaan laskettua merkittävästi suurempi. Kuvassa 3 esitetään hiilijalanjäljen jakautuminen käytettyjen energiamuotojen välillä.

### Hiilijalanjäljen jakautuminen työmaalla



Kuva 3. Asuinrakennuksen työmaatoimintojen hiilijalanjäljen jakautuminen energiamuotojen välillä (Hämäläinen J. 2012).

## 4 VAIKUTUSMAHDOLLISUUDET TUOTEVAIHEESSA

Rakennusurakoitsija on tärkeässä roolissa rakennuksen kokonaispäästöjen muodostamisessa. Urakoitsijalla on mahdollisuus vaikuttaa käytettäviin materiaaleihin ja tuotteisiin, ja tätä kautta voidaan osallistua vähähiilisten tuotteiden hankintaan. Urakoitsija voi tuotevalinnoilla vaikuttaa myös rakentamisvaiheen materiaalikuljetuksista aiheutuvaan päästömäärään sekä työmaalla käytettävään energiamäärään ja -muotoon. Tässä kappaleessa tarkastellaan tapoja, joilla rakennusurakoitsija voi osallistua hankkeen vähähiilisyyden edistämiseen.

Tuotevaiheen osuus tavanomaisesta uudisrakennushankkeesta on noin 30–50 % riippuen muun muassa käytettävistä rakennusmateriaaleista, kohteen rakennustyyppistä sekä käyttövaiheen energiankulutuksesta, jonka osuus on YM-menetelmällä laskettaessa usein samaa suuruusluokkaa tuotevaiheen kanssa. Vähähiilillä materiaali- ja tuotevalinnoilla voi olla todella merkittäviä vaikutuksia tuotevaiheen ja rakennuksen elinkaaren hiilijalanjälkeen – lähes jokaiseen rakennushankkeeseen on valittavissa sellaiset tuotteet valittujen rakennetyyppien rajoissa, joilla perusratkaisuun nähden tuotevaiheen hiilijalanjälki laskee 30 %. Uusien vähäpäästöisten materiaalien lisäksi tuotevaiheen hiilijalanjälkeä voidaan vähentää hyödyntämällä kierrätysmateriaaleja, joiden tuotevaiheen päästö ajatellaan olevan nolla.

Uusiutuvat tuotteet kuten puupohjaiset materiaalit ovat matalan tuotevaiheen hiilijalanjäljen ja kestävän rakentamisen periaatteiden näkökulmasta erinomaisia rakennusmateriaaleja. Uusiutuva rakennusmateriaali omaa lisäksi merkittävän hiilikädenjäljen, joka edistää rakennuksen elinkaaren ulkopuolelle jäävän D-vaiheen positiivisia ympäristövaikutuksia. Hiilikädenjäljellä tarkoitetaan niitä rakennushankkeessa syntyviä ympäristöhyötyjä, jotka jäisivät ilman rakennushanketta toteutumatta. Hiilikädenjälki ilmaistaan samalla yksiköllä kuin hiilijalanjälki, mutta ne eivät ole keskenään yhteenlaskettavissa.

Urakoitsijalla ei tyypillisesti ole mahdollisuutta vaikuttaa kohteen rakennetyyppeihin, joten tämän työn tarkoituksena on oletetaan rakennuksen toteutuksen perustuvan saatuihin suunnitelmiin. Urakoitsija voi kuitenkin vaikuttaa materiaalien, toimittajan ja tuotteiden valintaan. Saman tuoteryhmän sisällä voi olla sekä merkittäviä päästö- että kustannuseroja. Esimerkiksi eri ontelolaattojen välillä on huomattavia

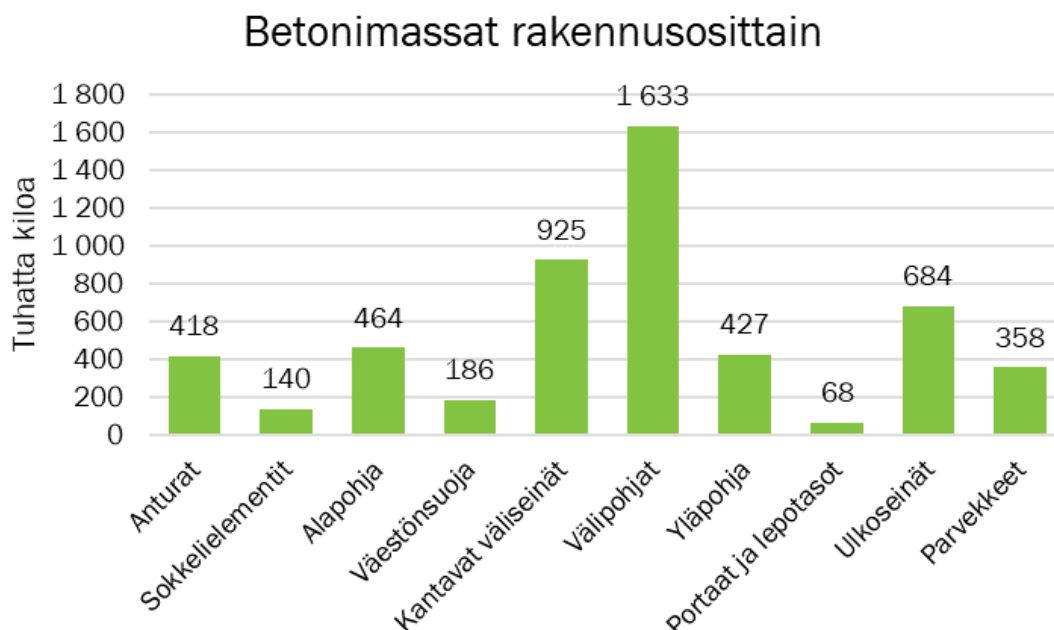
päästöeroja, ja vähäpäästöisellä tuotevalinnalla on merkittävä vaikutus kohteen tuotevaiheen päästömäärään. Tässä kappaleessa esitetään merkittävimpiä päästövähennyksiin vaikuttavia materiaali- ja tuotevalintoja tavanomaisessa rakentamisessa.

Rakennusten tuotevaiheessa suurin osa päästöistä muodostuu lähes aina runkorakennustuotteista. Ympäristöministeriön mukaisessa rakennusten hiilijalanjäljen laskentamenetelmässä hyödynnetään Suomen rakennusalalla standardoitua Talon 2000-nimikkeistöä rakennustuotteiden jaottelemiseksi. Nimikkeistö jaottelee runkorakennustuotteet (123) seuraaviin osiin:

- 1231 – Väestönsuojat
- 1232 – Kantavat seinät
- 1233 - Pilarit
- 1234 - Palkit
- 1235 - Välipohjat
- 1236 – Runkoportaat

Tavanomaisessa rakentamisessa nämä rakennusosat valmistetaan betonista tai teräksestä sekä nykyään myös puusta. Puutuotteille ominaisen pienen päästömäärän vuoksi tarkastelussa keskitytään betonista ja teräksestä valmistettuihin rakennustuotteisiin. Runkorakennustuotteiden lisäksi betonia hyödynnetään tyypillisesti myös perustus-, alapohja-, ja ulkoseinä-, ja ulkotasarakenteissa.

Tuotevaiheen päästövähennyksiin johtava vähäpäästöisten materiaalien hyödyntäminen lienee havainnollistavin todeta esimerkkikohteen kautta. Tyypillisen betonirakenteisen rakennuksen tuotevaiheen päästömääräksi laskettiin CO<sub>2</sub>-datan kansallisten päästökertoimien sekä kohteen rakennuslupavaiheen rakennusosa-arvioon perustuen 1 280 224 kgCO<sub>2</sub>e, eli 350,7 kgCO<sub>2</sub>e/nm<sup>2</sup> ja Ympäristöministeriön laskentamallin mukainen 7,0 kgCO<sub>2</sub>/nm<sup>2</sup>/a, mikä edustaa tyypillistä hiilijalanjälkitasoa asuinrakentamiselle. Kohde on asuinrakentamiselle tavanomaisesti betonirunkoinen, jossa on 5 408 tonnia betonituotteita, joista muodostuva päästömäärä on noin 171,1 kgCO<sub>2</sub>e/m<sup>2</sup> - 49 % kohteen tuotevaiheen päästömäärästä. Luku sisältää sekä rakennuksen paikallavaletun betonin että betonivalmisisosat, jotka jakautuvat painomääräisesti rakennusosiin kohteessa Kuvan 4 esittämällä tavalla.



Kuva 4. Tarkasteltavan kohteen betonimassat rakennusosittain.

#### 4.1 Paikallavalurakenteiden päästövähennysmahdollisuudet

Betonin pääraaka-aineet ovat sementti, kiviaines sekä vesi. Betonin ominaisuuksia voidaan muuttaa näiden suhteita muokkaamalla sekä erilaisilla lisäaineilla. (Betoni 2023). Sementin osuus betonissa on melko vähäinen, vain noin 8–16 paino-%, mutta se muodostaa suurimman osan betonin päästömäärästä. Sementin osuutta vähentämällä voidaan suoraa vaikuttaa betonimassan hiilijalanjälkeen.

Urakoitsijalla on mahdollisuus vaikuttaa paikallavalurakenteiden päästömäärään hankkimalla vihreää betonia. Vihreällä betonilla tarkoitetaan betonilaatua, jossa osa sementistä on korvattu muun teollisuuden sivutuotteina syntyvillä sideaineilla (Rudus 2023). Esimerkkinä laajasti hyödynnettävästä vihreän betonin sideaineesta on terästeollisuudessa syntyvä masuunikuona.

Suomessa merkittävin vihreän betonin tuottaja on Rudus. Rudus tuottaa neljää lineaarisesi vähäpäästöisempää betonilaatua, joiden hiilijalanjälki on 15–60 % tavanomaista betonia pienempi. Vihreän betonin hyödyntämisestä harkitessa tulee ottaa huomioon tavanomaista betonia hitaampi lujudenkehitys ja miten tämä tulee huomioida työmaa-aikataulussa. Vihreän betonin lopullinen lujuus vastaa tavallista betonia. (Rudus 2023).

Mikäli Kappaleessa 5 tarkastelemamme esimerkkirakennuksen kaikki betonirakenteet olisivat paikallavalettuja, voisi niiden päästöjä teoreettisesti vähentää Ruduksen vähäpäästöisimmällä tuotteella 60 %. Realistisesti vähäpäästöisin betonilaatu on kuitenkin hyödynnettävissä erikoisratkaisuna massiivirakenteissa. Parhaimpaan ja luotettavimpaan tulokseen päästää hyödyntämällä 30 % vähäpäästöisempää betonia perustuksissa ja pintabetonoinneissa, ja muuten 15 % vähäpäästöisempää laatua. Paikallavalettavan betonin päästmäärä lasketaan betonilaadusta riippuen kansallisen päästötietokannan mukaisella konservatiivisella laskenta-arvolla 0,106–0,2 kgCO<sub>2</sub>e/kg. Yleisimmin laskennassa käytettävä betonilaatu on C30/37, jonka konservatiivinen päästökerroin on 0,13 kgCO<sub>2</sub>e/kg. Mikäli Kuvassa 5 esitetyt betonimassat laskettaisiin tämän lujuusluokan betonille yllä esitetyn vihreän betonin laaduilla, saavutettaisiin -30,4 kgCO<sub>2</sub>e päästövähennys tavanomaiseen valmisbetonirakenteeseen verrattuna. Tämän vaikutus tuotevaiheen päästmäärään olisi noin -8,7 %.

Betonirakenteiden hiilijalanjälkeä laskettaessa tulee huomioida myös betonirauδοitukset. Betonissa hyödynnettävä teräs on pääosin kierrätettyä ja sillä on 98 % laskennallinen kierrätysaste (CO<sub>2</sub>data/SYKE). Tämän vuoksi betonin vetolujuuden kehittämiseen hyödynnettävän komponentin hiilijalanjälkeä on erittäin vaikea vähentää niin kauan, kun siinä hyödynnetään terästä.

## 4.2 Betonivalmisosat

Nykyaikaisissa rakennuksissa on tavanomaisesti massamääräisesti huomattavasti enemmän betonivalmisosia, kuin paikallavalettua betonia. Betonielementtejä käytetään kaikissa Kuvan 5 rakennusosissa paitsi anturoissa ja väestönsuojarakenteissa. Valmisosia hyödynnetään mainittujen rakennusosien lisäksi pilari- ja palkkirakenteissa esimerkiksi opetusrakennuksissa. Elementtien käytön laajuuden vuoksi niiden vaikutus tuotevaiheen päästöihin ja mahdollisiin päästövähennyksiin normaalitasoon nähden on suuri.

Betonivalmisosien tuotevaiheen hiilijalanjälki lasketaan kansallisen tietokannan tai kyseisen rakennustuotteen ympäristöselosteen mukaiseen arvoon perustuen. Ympäristöseloste eli EPD (Environmental Product Declaration) on riippumattomasti varmennettu elinkaarilaskentaan perustuva dokumentti, jossa esitetään kyseisen tuotteen ympäristövaikutukset (Rakennustietosäätiö 2023). Ympäristöselosteessa esitetään muun

muassa tuotteen tuotevaiheen hiilijalanjälki perustuen tapauskohtaiseen tietoon raaka-aineen hankinnasta (A1), materiaalin kuljetuksesta valmistukseen (A2) ja tuotteen valmistusprosessista (A3). Ympäristöselosteen mukaiseen, tuotekohtaiseen päästöarvoon perustuvalla hiilijalanjälkiarvioinnilla saadaan tarkin laskentatulokset kohteen päästö määrälle.

Suomessa on useita valmisbetonielementtien toimittajia, mutta ainoastaan Parma Oy:ltä löytyy ympäristöselosteet sekä tavanomaisille että vähähiilisille betonielementeille. Vähähiiliset betonielementit tuotetaan hyödyntämällä ympäristöystävällisempää betonimassaa, hiilioptimoimalla raaka-aine menekkiä sekä hyödyntämällä kierrätysmateriaaleja (Consolis Parma 2023). Lasketaan edellisessä kappaleessa esitetyn asuinkerrostalon betoniosien hiilijalanjälki käyttäen Parman valmisbetonielementtien ympäristöselosteiden mukaisia päästö määriä siltä osin, kun niitä on rakennusosittain käytettävissä. Laskennassa havaitut tulokset on esitetty Taulukossa 4.

Taulukko 4. Asuinkerrostalon tyypilliset valmisbetonielementit ja näiden hiilijalanjälki Consolis Parman ympäristöselosteiden mukaisesti.

Rakennusosa	Materiaali (Consolis Parma)	kg	kgCO <sub>2</sub> e	kgCO <sub>2</sub> e/m <sup>2</sup>
Sokkelielementit	Väliseinäelementti 200 mm	140 283	21 529	5,9
Alapohja	Ontelolaatta 370 mm	463 668	63 611	17,4
Kantavat väliseinät	Väliseinäelementti 200 mm	924 745	141 921	38,9
Välipohjat	Ontelolaatta 370 mm	1 632 738	223 998	61,4
Yläpohjat	Ontelolaatta 370 mm	427 041	58 587	16,1
Ulkoseinät	Väliseinäelementti 200 mm	683 988	104 972	28,8
<b>Yhteensä</b>		<b>4 272 464</b>	<b>614 618</b>	<b>168,4</b>

Tästä tarkastelusta on rajattu ulos betoniosat, joita ei valmisteta valmisosina, tai joille ei löydy ympäristöselostetta. Taulukossa 4 esitettyjen materiaalien hiilijalanjälki edustaa noin 46 % tyypillisen asuinkerrostalon tuotevaiheen päästö määrästä. Taulukossa 5 tarkastellaan Parman vastaavien, vähäpäästöisten tuotteiden hiilijalanjälkeä.

Taulukko 5. Consolis Parman vähähiilisten betonielementtien päästömäärä tarkasteltavassa kohteessa, ja näiden mahdollistama päästövähennys.

Rakennusosa	Materiaali (Low carbon)	kgCO <sub>2</sub> e	kgCO <sub>2</sub> e/m <sup>2</sup>	Päästövähennys tuotevaiheessa
Sokkelielementit	Väliseinäelementti 200 mm	13 756	3,8	-0,6 %
Alapohja	Ontelolaatta 370 mm	41 062	11,2	-1,8 %
Kantavat väliseinät	Väliseinäelementti 200 mm	90 677	24,8	-4,0 %
Välipohjat	Ontelolaatta 370 mm	144 593	39,6	-6,2 %
Yläpohjat	Ontelolaatta 370 mm	37 818	10,4	-1,6 %
Ulkoseinät	Väliseinäelementti 200 mm	67 069	18,4	-3,0 %
<b>Yhteensä</b>		<b>394 975</b>	<b>108.2</b>	<b>-17,2 %</b>

Parman vähäpäästöisillä valmisbetonielementeillä saavutetaan noin 35 % päästövähennys vastaaviin tavanomaisiin betonielementteihin verrattuna. Taulukossa 5 esitetyillä vähähiilisillä materiaalivalinnoilla päästään kyseisen asuinkerrostalokohteen tuotevaiheessa 17,2 % päästövähennykseen.

### 4.3 Teräsosat

Rakenteellista terästä hyödynnetään yleisimmin toimistorakennuksien palkistoissa sekä hallirakennusten kantavassa rungossa. Neitseellisellä teräksellä on todella suuri hiilijalanjälki, minkä vuoksi rakennusten elinkaarikonsultoinnissa pyritään ohjaamaan tuotevaiheen suunnittelua mahdollisimman vähäiseen uuden teräksen käyttöön. Teräsrakenteiseen runkoon päädyttäessä urakoitsija voi kuitenkin tehdä vastuullisia valintoja hiilijalanjäljen minimoimiseksi.

Kuten aiemmissa kappaleissa, tarkastellaan teräsrunkoisen kohteen päästöjä ja vaikutusmahdollisuuksia teräsosien päästöjen vähentämiseksi. Tarkasteltava kohde on korkea, 18-kerroksinen toimistorakennus, jossa on teräsrakenteiset pilari- ja palkkirakenteet. Kohteen tuotevaiheen hiilijalanjälki on 635,0 kgCO<sub>2</sub>e/m<sup>2</sup>, josta 24,6 % muodostuu teräsrakenteista. Raaka-aineen hankinta on tyypillisesti tuotevaiheen merkittävin päästöjen tuottaja, ja tämä on totta myös teräsrakenteiden osalta. Näin ollen

hyödyntämällä kierrätysmateriaalia teräksentuotannossa saavutetaan parhaat tulokset hiilijalanjalan pienentämisessä. Suomessa toimivista teräsrakenteiden tuottajista Peikolla on ympäristöselosteet sekä tavanomaiselle teräspalkille että vähähiiliselle versiolle, joten vaikutusmahdollisuutta päästömäärän on yksinkertaisin tutkia heidän tuotteidensa kautta.

Kyseisen toimistorakennuksen kantavista teräsrakenteista massamääräisesti 75 % on palkkeja, ja näiden muodostama hiilijalanjälki on noin  $117 \text{ kgCO}_2\text{e/m}^2$ . Peikko Group:in Deltabeam Green-teräspalkilla on noin puolet pienempi tuotevaiheen päästömäärä kuin vastaavalla tavanomaisella tuotteella (Peikko Group 2023). Liittopalkkina Deltabeam vaatii betonitäyttövalun, minkä vuoksi päästövähennys ei tule kierrätetyn teräksen osuudesta suoraa. Tavanomaisella C25/30 valmisbetonitäyttövalulla täytetty Deltabeam Green-palkisto on rakenteena noin 51 % tavanomaista liittopalkistoa vähäpäästöisempi. Näin ollen kohteen tuotevaiheessa saavutettaisiin noin  $-60 \text{ kgCO}_2\text{e/m}^2$  päästövähennys tällä rakenneratkaisulla, joka koko tuotevaiheessa edustaisi noin 9,5 % päästövähennystä.

#### **4.4 Muut tuotevaiheen päästövähennysmahdollisuudet**

Jokaisessa tuotevaiheen kategoriassa on mahdollista vaikuttaa hiilijalanjalan vastuullisilla tuote- ja materiaalivalinnoilla. Tuotevaiheen kokonaisuudessa jotkut rakennusosat ovat kuitenkin päästömäärässä vähäpätöisiä tai niin suuritöisiä määrittää, että niiden vähäpäästöisten ratkaisujen hankkiminen ja huomioiminen suunnittelussa voi osoittautua kustannustehottomaksi ja haastavaksi. Runkorakenteiden lisäksi merkittäviä tuotevaiheen päästöjä, joita kannattaa kuitenkin tarkastella muodostuu muun muassa aluerakentamisessa, julkisivuissa sekä vesikatoissa.

Aluerakentamisen päästömäärä määräytyy pääosin tontilla tarvittavasta paalutus- ja stabilointimäärästä. Urakoitsijan on vaikea vaikuttaa rakennuspaikan valintaan, mutta paalutusmateriaaliin ja stabiloinnissa käytettävien materiaalien suhteisiin voi ottaa kantaa. Erityisesti rakennuspaikalla tarvittava stabilointimäärä ja tästä aiheutuva päästömäärä voi kasvaa todella suureksi. Stabiloinnista syntyvän päästömäärän ajava tekijä on stabilointimassassa käytettävä sementti. Vähähiilisen valmisbetonin tavoin, stabilointimassassa sementin osuutta voidaan korvata vähäpäästöisemmällä materiaalilla, stabiloinnin tapauksessa yleensä kipsillä. Tyypillinen suhde kipsiä

hyödyntävässä stabilointimassa on kalkkia 30–40 %, kipsiä 30–40 % ja sementtiä 20–30 %. Tavanomaiseen kalkki-sementti seokseen nähden kipsiä hyödyntävä seos muodostaa noin 50-70 % pienemmän hiilijalanjäljen. (CO2data/SYKE). Suurten stabilointikohteiden tuotevalinnassa on siis aiheellista harkita kipsiä hyödyntäviä tuotteita ja tuottajia. Esimerkkinä tällaisesta on Nordkalk Oy Ab ja heidän Terra GTC-stabilointituote.

Julkisivupäästöt ovat sidoksissa valittuun julkisivumateriaaliin. Julkisivumateriaalin valinta on tyypillisesti arkkitehdin päätettävissä, mutta tuotevalinnalla päätetyn materiaalityypin sisällä voi olla suuri merkitys päästöjen vähentämisessä. Poltetut tiilet ovat hyvä esimerkki todella yleisesti käytettävästä julkisivumateriaalista, joiden valmistamisesta syntyy suuri hiilijalanjälki ja johon on helppo vaikuttaa tuotevalinnalla. Poltetut tiilet ovat erittäin tyypillinen julkisivuratkaisu, varsinkin asuinkerrostaloissa. Tiilien muodostama suuri päästömäärä johtuu niiden tuottamiseen tarvittavasta polttoprosessista, joka toteutetaan tyypillisesti käyttäen fossiilisia polttoaineita. Hiilijalanjäljen pienentämisen näkökulmasta tulisi suosia tiilivalmistajia, jotka voivat toteuttaa polttoprosessin vähäpäästöisemmällä energialähteillä. Tällainen valmistaja on esimerkiksi Wienerberger AG, joka tuottaa tiilensä maakaasulla, joka on vähäpäästöisin fossiilinen polttoaine. Tällä saavutetaan 30 % päästövähennys päästötietokannan arvoon nähden. Wienerbergerin vielä merkittävästi vähäpäästöisempi tiili tuotetaan biokaasulla, jonka tuotevaiheen päästö on 70 % tyypillistä matalampi.

Rakennuksen vaippa vuorataan lämmöneristeellä. Alapohjan ja ulkoseinien lämmöneristeet ovat usein kohteesta riippumatta samat. Alapohjassa on tavanomaisesti kova muovieriste, ulkoseinissä puolestaan mineraalivillalevy. Yläpohjan lämmöneristemateriaali vaihtelee rakennustyyppien ja kohteiden välillä huomattavasti alapohjaa ja ulkoseiniä enemmän. Yläpohjan eristemäärä on myös tyypillisesti huomattavasti muita suurempi, erityisesti matalissa rakennuksissa, joissa yläpohjan pinta-ala on rakennuksen nettoalaan nähden merkittävä.

Kuten julkisivussa yläpohjan lämmöneristemateriaalin valinnassa urakoitsijan päätäntävalta on vähäinen. Materiaalivalinta tehdään tyypillisesti rakennesuunnittelijan suosituksen mukaan, mikä vaikeuttaa urakoitsijan mahdollisuutta vähäpäästöisen materiaalivalinnan tekemiseksi. Tyypillisiä yläpohjan lämmöneristevaihtoehtoja ovat muun muassa kevytsora, mineraalivillalevyt sekä puhallusvilla. Näistä kevytsora on

huomattavasti suuripäästöisin, pääosin tarvittavan materiaalipaksuuden vuoksi. Mikäli yläpohjan ja vesikaton ominaisuudet ovat sellaiset, jotka vaativat kevytsoran raemaisten eristerakenteen, voidaan kevytsora korvata esimerkiksi kierrätyslasista valmistettavalla vaahtolasimurskeella, jonka päästö määrä on huomattavasti kevytsoraa pienempi ja on ominaisuuksiltaan vastaava. Puhallusvilla on puolestaan hiilijalanjäljen näkökulmasta paras. Puhallusvillan ollessa vaihtoehto lämmöneristeeksi, voidaan valita sellusta valmistettava puhallusvillavaihtoehto, jonka tuotevaiheen ominaispäästö on lämmöneristevaihtoehtoista vähäisin. Tilavuusmääräisesti puhallusvilla on noin 49 % kattojen lämmöneristeenä käytettävää mineraalivillaa vähäpäästöisempi. Sellusta valmistetun puhallusvillan hiilijalanjälki on puolestaan 96 % tavanomaista mineraalivillaa pienempi.

## 5 VAIKUTUSMAHDOLLISUUDET KULJETUKSISSA

## TYÖMAAN

Kappaleessa 2 osoitettu Suomen Ympäristökeskuksen mukainen päästö määrä rakentamisvaiheen kuljetuksille on  $27 \text{ kgCO}_2\text{e/m}^2$ . Painoarvo on taulukkoarvoperusteisessa laskennassa näin ollen rakennustyypistä riippuen 25–37 prosenttia rakentamisvaiheen päästöistä. Luvun muodostamiseen kuuluu useita komponentteja, kuten kuljetettavan materiaalin määrä, materiaalien kuljetusmatka, ajoneuvojen täyttöaste sekä polttoainekulutus ajettua matkaa kohden. Näiden yhteisvaikutusta tutkimalla voidaan selvittää selville käytetty polttoaine- tai energiamäärä. Käytetyn polttoaineen hiilijalanjälki on puolestaan riippuvainen sen päästökertoimesta.

Rakennusmateriaalin määrä on riippuvainen itse rakennuksesta, eikä täten voida ajatella tässä yhteydessä olevan kuljetuksien päästö määrään vaikuttavissa olevien tekijöiden joukossa. Muihin mainittuihin tekijöihin voidaan kuitenkin realistisesti vaikuttaa hiilijalanjälkeä vähentävästi. Kuljetusmatkaa voidaan vähentää suosimalla työmaan lähiympäristössä tuotettuja materiaaleja. Ajoneuvon täyttöaste voidaan maksimoida tarvittavien ajokertojen vähentämiseksi. Käytettävät ajoneuvot voidaan valita siten, että niiden kulutus on pieni, tai että ne käyttävät polttoainetta, jonka ominaispäästö on maltillinen.

### 5.1 Hiilijalanjäljen muodostuminen kuljetuksissa

Tyypillisessä betonirunkoisessa rakennuksessa noin 80–90 % kohteessa käytettävien rakennustuotteiden massasta (maamassoja huomioimatta) on betonituotteita. Paikallavalettujen ja betonivalmisosien osuus vaihtelee kohdekohtaisesti suuresti, mutta nykyrakentamiselle elementtirakentaminen on tavanomaista, minkä vuoksi suurin osa betonituotteista on valmisosia. Keskimääräisen kuljetusmatkan vähentämisen kannalta on siis erityisen tärkeä keskittyä betonituotteiden hankkimiseen työmaan lähiympäristöstä. Toinen merkittävä massa on maaosat, jotka voivat suuren aluerakentamisen vaativissa hankkeissa käsittää puolet tuotevaiheen kokonaismassasta. Maaosat ovat tyypillisesti soraa ja hiekkaa, joiden tuominen yli 50 kilometrin päästä on lähtökohtaisesti tarpeettoman kuuloista.

Työmaan kuljetuksien hiilijalanjäljen vähentämisessä merkityksellisintä on siis vaikuttaa betoni- ja maaosien kuljetuksiin. Tarkastellaan kuljetusetäisyyden muutoksien sekä kuljetukseen käytettävien energiamuotojen tuomia päästöeroja rakentamisen päästötietokannan taulukkoarvoon nähden. Tarkasteltava kohde on asuinkerrostalo, jonka runko muodostuu sekä paikallavaletusta betonista että betonivalmisisista. Taulukossa 6 esitetään tarkasteltavan kohteen tuotevaiheen massat ja näiden kuljetuksesta työmaalle muodostuva hiilijalanjälki.

Taulukko 6. Tarkasteltavan kohteen rakennusmassat, näiden kuljetusetäisyydet ja kuljetuksista muodostuva hiilijalanjälki.

Rakennusmateriaali	Massa (kg)	Osuus kokonaismassasta (%)	Edestakainen kuljetusmatka (km)	Kuljetuksesta muodostuva päästö (kgCO <sub>2e</sub> )
Maa-ainekset	5 625 300	46,4 %	102	60 660
Pohjarakennustuotteet	164 700	1,4 %	102	1 776
Valmisbetoni	3 192 622	26,3 %	102	34 427
Betonivalmisisat	2 641 310	21,8 %	102	28 482
Metallituotteet	80 023	0,7 %	102	863
Muuraustuotteet	166 716	1,4 %	102	1 798
Puutavara	15 503	0,1 %	102	167
Vesikatteet	5 670	0,0 %	102	61
Rakennuslevyt	57 913	0,5 %	102	624
Eristeet	35 738	0,3 %	102	385
Täydentävät rakennustuotteet	42 578	0,4 %	102	459
Pintatuotteet	45 082	0,4 %	102	486
Talotekniikka	47 514	0,4 %	102	512
<b>Yhteensä</b>	<b>12 120 668</b>			<b>130 702</b>

Betoniosien ja maa-aineksen osuus kokonaismassasta ja muodostuvasta hiilijalanjäljestä on 94,5 %. Mikäli kuljetusetäisyyksiksi vaihdettaisiin realistisempi kuljetusmatka, esimerkiksi maa-aineksille 20 kilometriä, valmisbetonille 30 kilometriä ja valmisbetoniosille 70 kilometriä, olisi kohteen työmaakuljetuksista muodostuva hiilijalanjälki 48 699 kgCO<sub>2e</sub>, mikä edustaisi noin 63 prosentin päästövähennystä. Kuljetusetäisyydet vaihtelevat merkittävästi rakennuspaikan ja mahdollisten hankintasopimusten mukaan. Yllä mainitut kuljetusetäisyydet edustavat mahdollisia matkoja materiaalintarjoajan ja työmaan välillä suomen suurimmissa kaupungeissa.

## 5.2 Vähähiilisten polttoaineiden hyödyntäminen

Kuljetuksissa hyödynnettävien ajoneuvojen kuluttaman polttoaineen ominaispäästö on toinen yksinkertaisesti arvioitavissa oleva vaikutusmahdollisuus työmaakuljetuksissa muodostuvan hiilijalanjäljen määrässä. Varteenotettavia vaihtoehtoja ovat biokaasulla, uusiutuvalla dieselillä ja sähköllä kulkevat ajoneuvot. Vähäpäästöisen polttoaineen vaikutus työmaakuljetuksien hiilijalanjälkeen on suoraan verrannollinen sen ominaispäästön suhteesta tavanomaiseen polttoaineeseen verrattuna.

Biokaasun ominaispäästö on noin 90 % tavanomaista polttoainetta pienempi (Posti 2020). Biokaasu valmistetaan Suomessa muun muassa kotitalouksien ja tuotannon biohajoavasta jätteestä (Gasum 2023). Toinen tarkasteltava vaihtoehto vähäpäästöiselle polttoaineratkaisulle on uusiutuva diesel. Uusiutuvalla dieselillä tarkoitetaan parafiinista dieseliä, joka valmistetaan ruokateollisuuden kasvi- ja eläinravoista. Uusiutuvan dieselin raaka-aineiden päästömäärä on teoreettisesti nolla, mutta valmiin tuotteen valmistusprosessi nostattaa elinkaaren päästömäärän noin 10–25 prosenttiin tavanomaisen polttoaineen elinkaaren hiilijalanjäljestä. (Neste 2023).

Sähkörekkojen kilometrikohtainen sähkönkulutus liikkuu ajoneuvon ominaisuuksien, kuten aerodynamiikan mukaan välillä 0,98–0,123 kWh/km (Earl T. 2018). Kuorma-auton maksimikuormaksi arvioidaan 40 tonnia. Rakentamisen päästötietokannan mukaisesti kuormausasteeksi asetetaan 75 %, ja palaavan kuorma-auton kuormausasteeksi 0 %, josta saadaan keskimääräinen kuormausaste 37,5 %. Näillä oletuksilla lasketaan sähkökuorma-auton sähkönkulutuksesta muodostuva hiilijalanjälki Taulukossa 6 esitetylle valmishbetonille edestakaisella kuljetusetäisyydellä 102 km.

Tarvittava ajomäärä:

$$\frac{3\,192\,622\text{ kg} * 102\text{ km}}{40\,000\text{ kg} * 37,5\%} = 21\,709,83 \approx 21\,710\text{ km}.$$

Sähkönkulutus:

$$21\,710\text{ km} * \frac{(0,98 + 1,23)\frac{\text{kWh}}{\text{km}}}{2} = 23\,989,36\text{ kWh} \approx 24\,000\text{ kWh}.$$

Sähkönkulutuksesta muodostuva hiilijalanjälki:

$$24\,000\text{ kWh} * 140,2 \frac{\text{gCO}_2\text{e}}{\text{kWh}} = 3\,363\,309\text{ gCO}_2\text{e} = 3\,363,3\text{ kgCO}_2.$$

Laskettu kuorma-auton sähkönkulutuksesta muodostuva hiilijalanjälki on 90,3 % vähemmän kuin Taulukossa 6 esitetty arvo valmisbetonin kuljetuksille. Sama päästövähennys on sovellettavissa myös muille rakennusmateriaaleille.

### 5.3 Työmaan kuljetusten vähähiilisyyden potentiaali

Taulukossa 6 esitetyn kohteen työmaakuljetuksista muodostunut hiilijalanjälki on maa-aineksien kuljetukset huomioituna 130 702 kgCO<sub>2</sub>e, ja ominaispäästö 35,8 kgCO<sub>2</sub>e/nm<sup>2</sup>. Yllä esitettyssä esimerkinomaisessa kehitetyn kuljetusmatkan mukaisessa tarkastelussa ominaispäästö on 13,3 kgCO<sub>2</sub>e/nm<sup>2</sup>. Polttoainetarkasteluissa puolestaan 90 % päästövähennys ilmeni jokaisessa tarkastelussa, jota hyödyntämällä saavutettaisiin 3,6 kgCO<sub>2</sub>e/nm<sup>2</sup> ominaispäästö. Kehitetyn kuljetusmatkan ja vähäpäästöisen polttoaineen yhteisvaikutteisella hyödyntämisellä päästäisiin puolestaan noin 1,3 kgCO<sub>2</sub>e/nm<sup>2</sup> ominaispäästöön. Rakennusmateriaalien kuljetuksen hiilijalanjälkeen voidaan siis vaikuttaa merkittävästi.

## 6 VAIKUTUSMAHDOLLISUUDET ENERGIANKULUTUKSESSA

## TYÖMAAN

Diplomityössä selvitetään rakennustyömaalla tehtävien toimien muodostama hiilijalanjälki perustuen todelliseen energiankulutustietoon. Rakentamisvaiheen hiilijalanjäljen ilmoittaminen taulukkoarvoihin perustuen ei kannusta vähähiilisten toimien edistämiseen, eikä edesauta pienten hiilijalanjäljen työmaiden erottamista suuripäästöisistä. Tässä kappaleessa esitetään useiden työmaiden energiankulutustiedot ja näistä aiheutuvat kasvihuonekaasumäärät sekä tutkitaan saatujen tulosten vertautuvuutta YM-menetelmässä käytettäviin SYKE:n tarjoamiin taulukkoarvoihin. Laskennassa hyödynnettävät energiamuotojen päästökertoimet esitetään Taulukossa 7. Päästökertoimet ovat SYKE:n rakentamisen päästötietokannan (2022) mukaiset täsmällisen vertailun työmaatoimintojen ominaispäästöjen taulukkoarvojen kanssa. Ulkolämpötila perustuu (Ilmatieteen laitoksen 2023) säähavaintojen latauspalvelun mukaisiin arvoihin.

Taulukko 7. Rakentamisen päästötietokannan (2022) mukaiset ominaispäästökertoimet työmaalla kuluville energiamuodoille.

Päästökertoimet	gCO <sub>2</sub> e/kWh
Sähkö	140,2
Kaukolämpö	140,4
Nestekaasu	306
Polttoöljy	306
Diesel	306

### 6.1 Toteutunut tuntitasoinen energiankulutus

Hotelli A on majoitusliikerakennus, josta sähköenergiankulutustietoa on olemassa ajankohdalta 1.6.2022 – 15.1.2023. Kulutustieto alkaa sisävalmistustöiden alkuvaiheesta ja jatkuu luovutusvaiheeseen asti. Koska sähkönkulutustieto ei ala työmaan käynnistymishetkestä, on hankeen rakentamisvaiheen kokonaissähkönkulutustiedon analysointi todella epätarkkaa. Lisäksi kokonaisuudesta puuttuu muut käytetyt energiamuodot.

Tarkasteltavassa kohteessa on kuitenkin erittäin tiheä, tuntitasoinen sähkön kulutustieto, josta on mielenkiintoista tarkastella, miten energiankulutus muuttuu kellonajan sekä aktiivisen työajan ja työmaan tyhjillään olemisen välillä. Taulukossa 8 esitetään kohteen sähkönkulutukseen liittyviä tunnuslukuja.

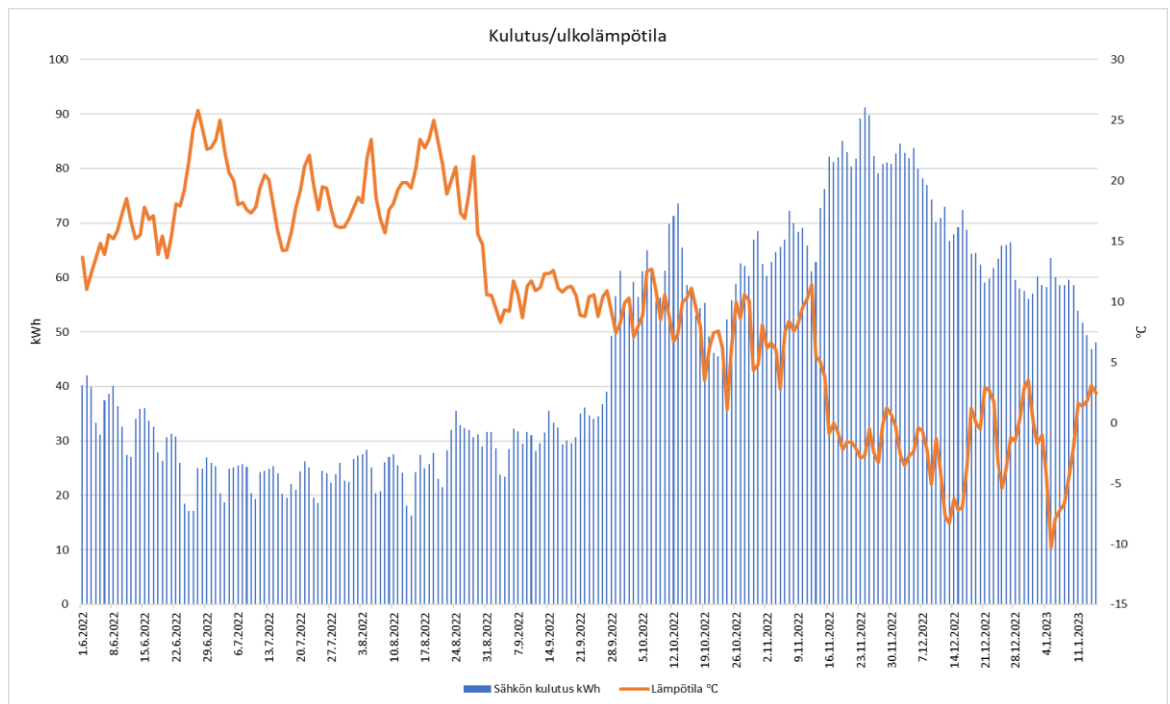
Taulukko 8. Tarkasteltavan majoitusliikerakennuksen sähköenergiankulutus työaikana ja sen ulkopuolella.

Kokonaiskulutus	253 366 kWh
Kulutus arkipäivinä	184 671 kWh
Kulutus viikonloppuina	68 623 kWh
Työtuntien määrä	1 630 h
Aktiivisena työaikana kulunut energia	83 540 kWh
Teho aktiivinen työaika	51,3 kW
Tunnit kun työmaa tyhjillään	3 866 h
Teho kun työmaa tyhjillään	43,9 kW

Päivittäiseksi työmääräksi on arvioitu 1 630 tuntia. Laskennallinen arkipäivien aktiivinen työaika on kymmenen tuntia, jonka on arvioitu sijoittuvan kello 07.00–17.00 väliselle ajalle. Tänä aikana kulunut sähkömäärä on noin 83,5 MWh. Tästä saadaan laskettua aktiivisen työajan sähkönkulutuksen tehoksi 51,3 kW. Työajan ulkopuolinen teho on puolestaan 43,9 kW, mikä tarkoittaa, että aktiivisena työaikana sähköä on kulunut noin 17 % enemmän kuin muulloin.

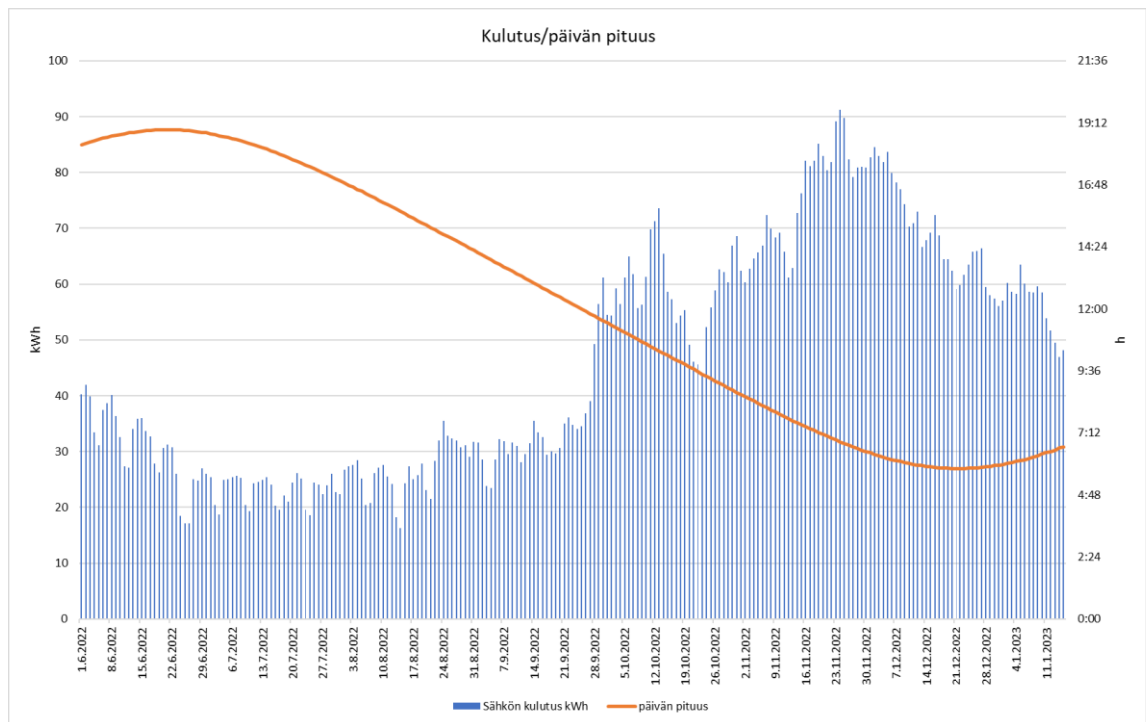
Sähkönkulutusten erot ovat tapausten välillä melko vähäiset. Tästä on pääteltävissä, että valaisimet ja sähköä kuluttava laitteisto ovat olleet käytössä samalla teholla riippumatta siitä, onko työmaalla ketään paikalla. Mikäli tätä tulosta verrataan kappaleessa 3.5 käsiteltyyn Hämäläisen tutkimustulokseen työmaan sähkökäyttötottumuksista, jossa todetaan, että työmaan sähköenergiasta 70 % kuluu valaistukseen, voidaan arvioida tässä kohteessa valaistuksen olleen vakiotasolla jatkuvasti päällä vuorokausitasolla.

Ulkolämpötilan vaihtelu vaikuttaa erityisesti kohteen lämmitystarpeeseen. Lämmitystä ei tässä kohteessa ole toteutettu sähköllä, minkä vuoksi ulkolämpötila ei juurikaan vaikuta sähkönkulutukseen. Tarkastelujakso käsittää kesä- ja syyskuukaudet sekä alkutalvea. Kuvassa 5 esitetään kuluneen sähköenergian päivätasoinen määrä sekä ulkolämpötila.



Kuva 1. Hotelli A sähkön kulutus ja ulkolämpötila.

Kuvasta 5 voidaan nähdä, että sähkönkulutus kasvaa huomattavasti syyskuun loppupuolelta alkaen ja on huipussaan marraskuun ja joulukuun vaihteessa. Lisääntyvää sähkönkulutuksen tarvetta voidaan selittää valaistustarpeen kasvulla. Valaistuksen ollessa pääasiallinen sähköä kuluttava tekijä, on aiheellista tarkastella myös kulutuskäyttäytymistä vuodenajan vaihtelun, ja tämän johdannaista päivän pituuden, mukaan. Suomessa vuodenajalla on erittäin merkittävä vaikutus luonnollisen valon määrään, mikä vaikuttaa oleellisesti tarvittavan valaistuksen määrään. Kuvassa 6 esitetään kohteen sähkönkulutus ja päivän pituus tunteina.



Kuva 6. Hotelli A sähkön kulutus ja päivän pituus.

Kuvasta 6 huomataan, että sähkönkulutus kasvaa merkittävästi auringonvalon määrän vähentyessä. Valon määrän kääntyessä kasvuun joulukuun puolella välissä, on myös huippusähkönkulutuksen piikki selätetty. Tästä voidaan päätellä, että helmikuussa, joka on Suomessa tyypillisesti vuoden kylmin kuukausi, tarvittava sähkönkulutusmäärä on vähäisempi kuin tarkastellun kohteen huipussa marraskuussa. Näin ollen voidaan ajatella, että näkemys kuluvan sähkömäärän painottumisesta valaistukseen lämmityksen sijaan on oikea.

Tarkastellaan vielä eri kuukausien vuorokauden keskiarvokulutukset sekä sähkönkulutuksesta vuorokausitasolla muodostuva hiilijalanjälki. Koska tarkasteltavan kohteen dokumentoitu sähkönkulutus ei vastaa koko rakentamisvaiheen aikaista kulutusmäärää, hankkeesta ei voida todeta kokonaiskuvaa sähkönkulutuksen aiheuttamasta hiilijalanjäljestä. Vuorokausitasoinen päästötieto kuukausien välillä on kuitenkin mielenkiintoinen tieto, jota voi jatkossa hyödyntää karkeana arviona sähkönkulutuksesta muodostuvien kasvihuonekaasupäästöjen vertailussa. Taulukossa 9 esitetään kohteen kuukausittainen keskivuorokauden sähkönkulutus ja tästä muodostuva hiilijalanjälki. Laskennassa käytetty nettoala on 13 200 nm<sup>2</sup>.

Taulukko 9. Tarkasteltavan majoitusliikerakennuksen vuorokausitasoinen sähkönkulutus kuukausittain ja tästä aiheutuva hiilijalanjälki.

Kuukausi	Sähkönkulutus kWh/vrk	Hiilijalanjälki kgCO <sub>2</sub> e	Hiilijalanjälki kgCO <sub>2</sub> e/nm <sup>2</sup>
Kesäkuu	742	104,0	0,0079
Heinäkuu	555	77,8	0,0059
Elokuu	644	90,3	0,0068
Syyskuu	816	114,4	0,0087
Lokakuu	1 408	197,5	0,0150
Marraskuu	1 801	252,5	0,0191
Joulukuu	1 664	233,2	0,0177
Tammikuu	1 349	189,1	0,0143

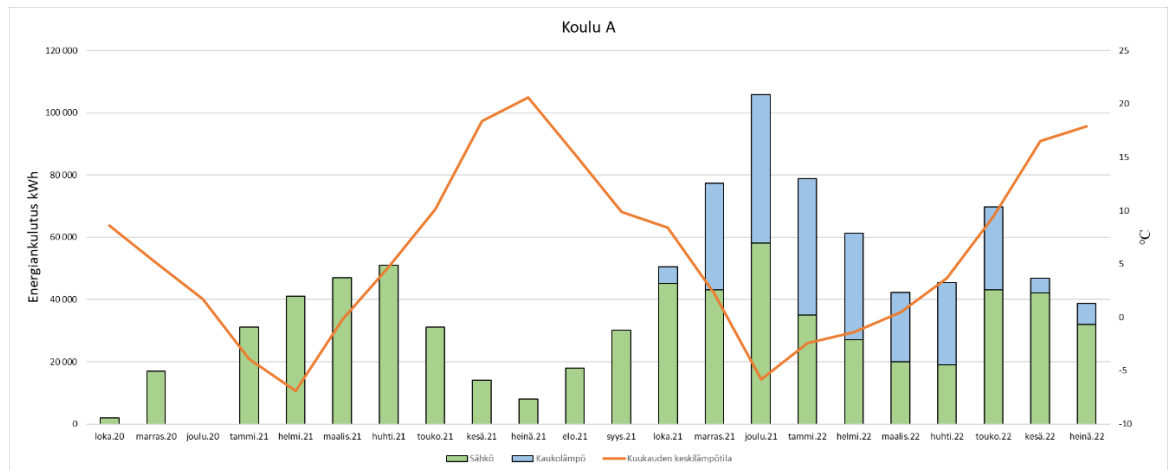
Taulukosta 9 on huomattavissa, että sähkönkulutuksen huippukuukautena (marraskuu) energiaa kuluu yli kolminkertainen määrä verrattuna kuukauteen, jossa sähkönkulutus on ollut matalin (heinäkuu). Muodostunut hiilijalanjälki on suoraan verrannollinen kulutettuun energiaan, jolloin kasvihuonekaasujen päästömäärän minimi- ja maksimiarvot sijoittuvat samoille kuukausille, kuin sähkönkulutuksen vastaavat raja-arvot.

## 6.2 Toteutunut energiankulutus opetusrakennushankkeissa

Työssä tarkastellaan viiden opetusrakennuksen työmaatoimintojen energiankulutuksia ja niistä muodostuvia hiilijalanjälkiä. Opetusrakennuksilla tarkoitetaan rakennuksia, jotka on tarkoitettu opetukseen, koulutukseen, varhaiskasvatukseen ja tieteelliseen tutkimukseen (Tilastokeskus 2018). Kohteet ovat 2020-luvulla valmistuneita betonielementtirunkoisia, nykyrakentamiselle tavanomaisia rakennuksia, joiden energiankulutuksen ja tästä koostuvan hiilijalanjäljen tulisi edustaa tyypillisen opetusrakennuksen arvoja. Opetusrakennuksille ei kerätty polttoaineen kulutustietoja, minkä vuoksi polttoainekulutusten tarkkaa määrää ja niiden käytöstä aiheutuvaa hiilijalanjälkeä ei voida laskea. Polttoaineen kulutuksesta voidaan arvioida aiheutuvan noin 20–30 % lisäys kasvihuonekaasujen päästömäärään.

### 6.2.1 Koulu A

Kohde on Espooseen vuonna 2022 valmistunut kolmekerroksinen koulu. Kohteen rakentamisaika kesti 22 kuukautta, mikä on tavanomainen rakentamisaika opetusrakennukselle. Kuvassa 7 esitetään kohteen rakentamisvaiheen kuukausittainen energiankulutus käytettyihin energiamuotoihin jaoteltuna.



Kuva 7. Koulu A rakentamisvaiheen kuukausittainen energiankulutus.

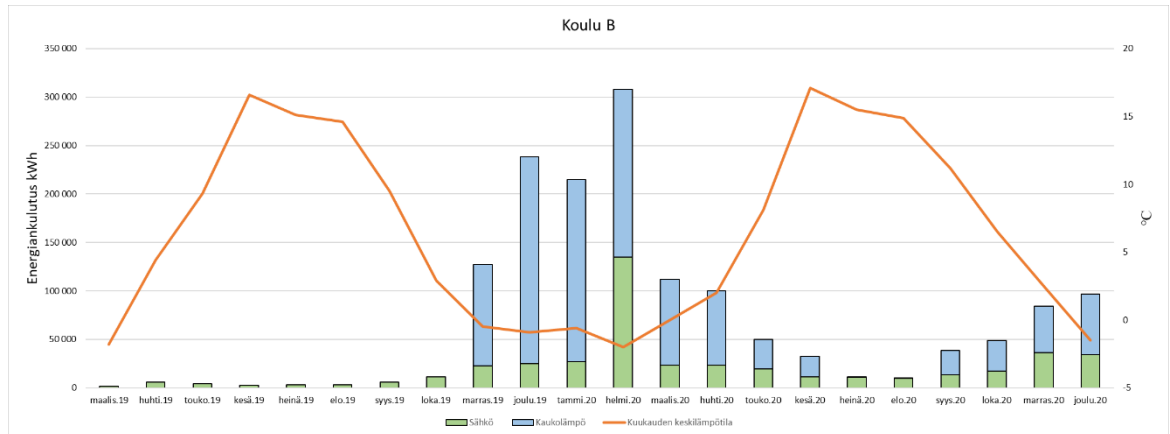
Kohteen rakentamisvaihe toteutettiin lokakuun 2020 ja heinäkuun 2022 välisinä aikoina. Rakentamisvaiheen ensimmäisen vuoden aikana kului ainoastaan sähköenergiaa, josta merkittävin osuus kului valaistukseen ja työmaakoppien lämmitykseen. Kaukolämpöä alettiin hyödyntämään vasta rakennuksen vaipan ollessa ummessa, ja sitä kului rakennuksen valmistumiseen asti. Kuvasta 7 on selkeästi huomattavissa energiankulutuksen vaihtelu vuodenajan ja ulkolämpötilan mukaan.

Kohteen dokumentoitu rakentamisen aikainen kokonaisenergiankulutus oli 907 382 kWh, mikä vastaa tämän kohteen osalta 182,0 kWh/nm<sup>2</sup> ominaisenergiankulutusta. Tästä noin 72 % on sähköenergian kulutusta, mikä on huomattavasti tavanomaista suurempi rakentamisvaiheen sähkönkulutuksen osuus. Loput rakentamisvaiheessa kuluneesta energiasta oli kaukolämpöä. Kohteen rakentamisvaiheessa muodostunut hiilijalanjälki on 130 471 kgCO<sub>2</sub>e, joka edustaa ominaispäästöä 26,2 kgCO<sub>2</sub>e/nm<sup>2</sup>.

### 6.2.2 Koulu B

Kohde on Etelä-Savoon vuonna 2020 valmistunut kaksikerroksinen opetusrakennus. Kohteen rakentamisaika kesti 22 kuukautta. Kuvassa 8 esitetään kohteen

rakentamisvaiheen kuukausittainen energiankulutus käytettyihin energiamuotoihin jaoteltua.



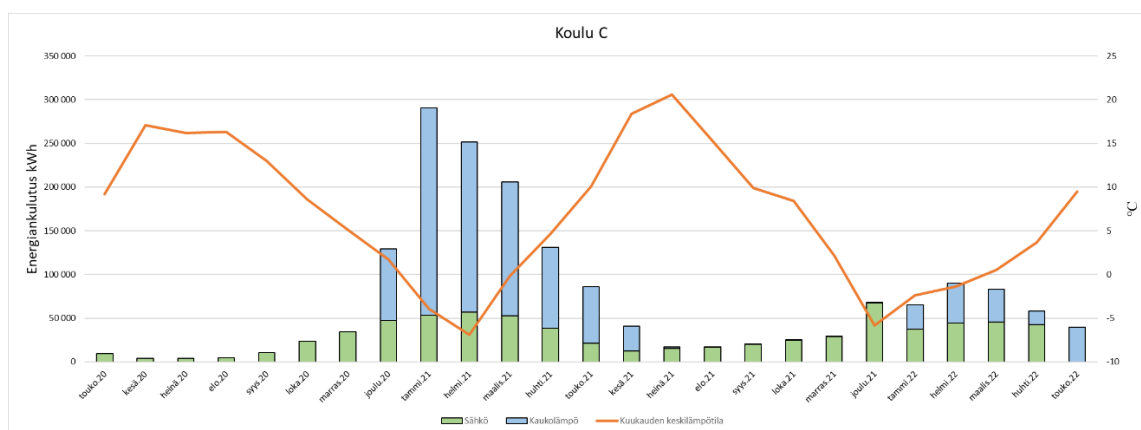
Kuva 8. Koulu B rakentamisvaiheen kuukausittaisen energiankulutus.

Rakentamisvaiheen kokonaisenergiankulutus polttoaineita lukuun ottamatta oli 1 507,5 MWh ja 189,7 kWh/nm<sup>2</sup>. Kohteessa energiajakauma on rakentamisvaiheelle tyypillinen, jossa suurin osa ostoenergiasta on kaukolämpöä. Kaukolämpöä kului kohteen rakentamisvaiheessa 1 064,2 MWh, joka edustaa noin 71 % ostoenergian kulutuksesta. Loput kuluneesta ostoenergiasta oli sähköä.

Kuvasta 8 voidaan todeta, että rakentamisvaiheen alussa sekä kesäkuukausina energiankulutus on erittäin vähäistä. Energiaa kuluu puolestaan eniten talvella, merkittävimmin helmikuussa, jolloin ulkoilmanlämpötila on ollut matalin. Kohteen rakentamisvaiheesta muodostuva hiilijalanjälki on 225 994 kgCO<sub>2</sub>e, joka edustaa ominaispäästöä 28,4 kgCO<sub>2</sub>e/nm<sup>2</sup>.

### 6.2.3 Koulu C

Kyseinen kohde on kolmekerroksinen koulu, joka valmistui Espooseen keväällä 2022. Kohteen rakentamisaika oli 25 kuukautta, mikä on tarkastelujoukon pitkäkestoisin. Kuvassa 9 on esitetty kohteen rakentamisen aikainen energiankulutus.



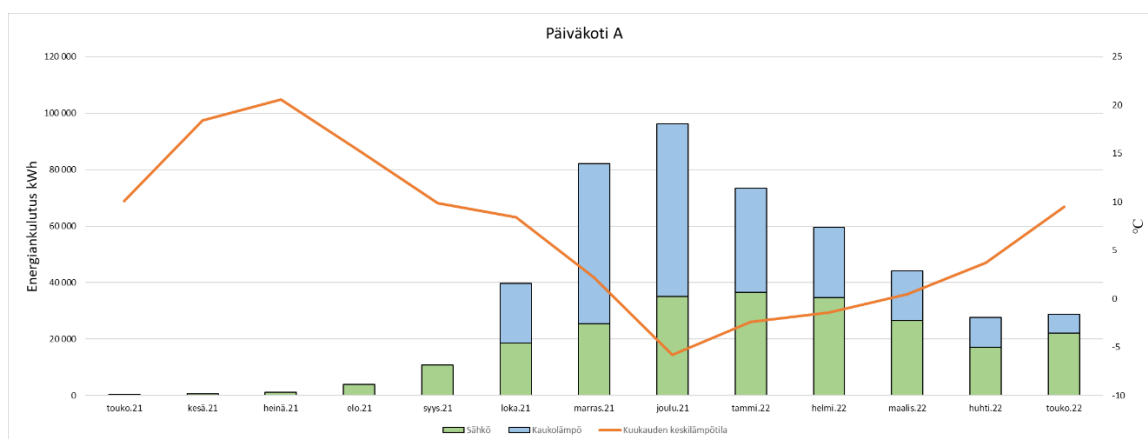
Kuva 9. Koulu C rakentamisvaiheen kuukausittaisen energiankulutus.

Kuvasta 9 voidaan todeta hyvin merkittävä energiankulutusmäärän vaihtelu vuodenaikojen mukaan. Kohteen työmaalla kului pelkkää sähköenergiaa rakentamisvaiheen ensimmäisinä kuukausina. Kaukolämpö kytkettiin päälle joulukuussa 2020, jonka jälkeen jokaisessa kuussa kaukolämmön kulutus oli yli 20 000 kWh heinäkuuhun 2021 asti. Energiankulutus oli tämän jälkeen tammikuuhun 2022 asti pääsääntöisesti sähkönkulutusta. Mielenkiintoisesti kaukolämmön määrä oli alhainen joulukuussa 2021, jolloin keskilämpötila on ollut merkittävästi pakkasen puolella mikä viittaa muiden energiamuotojen, todennäköisesti polttoaineiden hyödyntämisen rakennuksen lämmityksessä.

Kohteen rakentamisvaiheen kokonaisenergiankulutus oli 1 739,2 MWh ja ominaisenergiankulutus 178,3 kWh/nm<sup>2</sup>. Ominaisenergiankulutus edustaa tarkasteltavien kohteiden laajuudessa tyypillistä tasoa. Valtaosa kokonaisenergiankulutuksesta oli kaukolämpöä, jonka osuus oli noin 59 %. Energiankulutuksesta muodostunut hiilijalanjälki oli 251 532 kgCO<sub>2</sub>e, joka vastaa ominaispäästöä 25,8 kgCO<sub>2</sub>e/nm<sup>2</sup>.

#### 6.2.4 Päiväkoti A

Kohde on ainoa työssä tarkasteltava päiväkotitoimitus. Rakennus valmistui Espooseen keuhvällä 2022. Päiväkotikohteena rakennus on muihin tarkasteltaviin opetusrakennuksiin verrattuna huomattavasti pienempi, mikä näkyy muun muassa rakentamisvaiheen kestossa. Kohteen rakentamisvaihe kesti vain 13 kuukautta, mikä on tyypillistä merkittävästi lyhyempi. Kuvassa 10 esitetään kyseisen kohteen rakentamisvaiheen kuukausittainen energiankulutus käytettyihin energiamuotoihin jaoteltuna.



Kuva 2. Päiväkoti A rakentamisvaiheen kuukausitason energiankulutus.

Kohteen työmaatoiminta aloitettiin toukokuussa 2021. Rakentamisvaiheen ensimmäisinä viitenä kuukautena rakennustyömaalla kului ainoastaan sähköä, jonka jälkeen rakennuksen vaippa saatiin valmiiksi. Tästä eteenpäin työmaalla kului sähköä ja kaukolämpöä kasvavassa määrin alkuvuoteen 2022 asti, jonka jälkeen kokonaisenergiankulutus laski tasaisesti luovutusvaiheeseen asti. Työmaan kokonaisenergiankulutus oli 468 448 kWh, mikä vastaa 233,1 kWh/nm<sup>2</sup> ominaisenergiankulutusta. Sähköä ja kaukolämpöä kului lähes yhtä paljon rakentamisvaiheen aikana. Kohteen rakentamisvaiheesta muodostuva hiilijalanjälki on 66 797 kgCO<sub>2</sub>e, joka edustaa ominaispäästöä 33,2 kgCO<sub>2</sub>e/nm<sup>2</sup>. Tyypillistä lyhyemmästä rakentamisvaiheesta huolimatta ominaispäästö on muita tarkasteltavia kohteita suurempi.

### 6.2.5 Opetusrakennusten rakentamisvaiheen ominaispäästö

Tutkimuksessa tarkasteltiin viiden opetusrakennuksen rakentamisvaiheen energiankulutustottumuksia ja näistä juontuvaa hiilijalanjälkeä. Ympäristöministeriön laskentamenetelmässä käytettävä taulukkoarvo opetusrakennusten rakentamisvaiheen ominaispäästölle on 60 kgCO<sub>2</sub>e/nm<sup>2</sup>, joka tutkittujen kohteiden rinnalla vaikuttaa liian korkealta arvolta. Yhteenveto tarkasteltujen opetusrakennusten tukituista tunnusluvuista esitetään Taulukossa 10.

Taulukko 10. Yhteenveto tarkasteltujen opetusrakennusten energiankulutuksen ja hiilijalanjäljen tunnusluvusta.

	Ominaisenergiankulutus kWh/nm <sup>2</sup>	Ominaispäästö kgCO <sub>2</sub> e/nm <sup>2</sup>	Ominaispäästö/ kuukausi
Koulu A	182,0	26,2	1,19
Koulu B	189,7	28,4	1,29
Koulu C	178,3	25,8	1,03
Päiväkoti A	233,1	33,2	2,56
Keskiarvo	195,8	26,4	1,4

Tutkituista opetusrakennuksista suurin ominaispäästö oli päiväkodilla, jonka ominaispäästö oli 33,2 kgCO<sub>2</sub>e/nm<sup>2</sup>. Matalin puolestaan koulukohteella C, jonka ominaispäästö oli 25,8 kgCO<sub>2</sub>e/nm<sup>2</sup>. Koulukohteiden ominaispäästöt ovat erittäin lähellä toisiaan, mikä kasvattaa luottamusta tulosten oikeellisuuteen.

Tarkasteltujen kohteiden ominaispäästön keskiarvo on 28,4 kgCO<sub>2</sub>e/nm<sup>2</sup>. Jos tähän lisätään arvioitu 20–30 % polttoaineiden kulutuksesta aiheutuva päästömäärä, niin kyseinen luku asettuu noin 34,1 kgCO<sub>2</sub>e/nm<sup>2</sup> ja 36,9 kgCO<sub>2</sub>e/nm<sup>2</sup> välille. Näin ollen todetaan opetusrakennuksien ominaispäästön olevan noin 35,5 kgCO<sub>2</sub>e/nm<sup>2</sup>, mikä on noin 41 % YM-menetelmän mukaista arvoa pienempi. Kohteiden rakentamisvaiheessa hyödynnetyt energiamuodot ja näiden osuudet on esitetty Taulukossa 11.

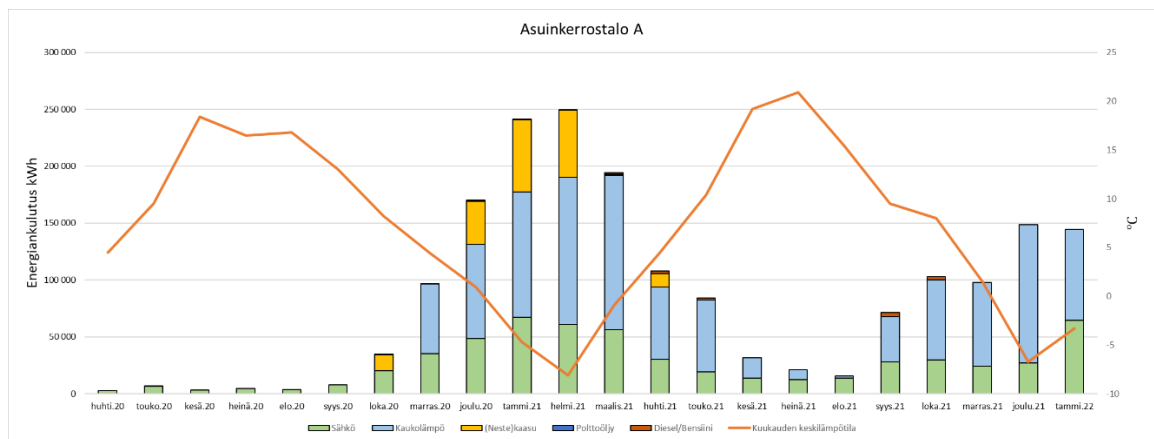
Taulukko 11. Tarkasteltujen opetusrakennusten rakentamisvaiheen aikana kulunut energia ja näiden jakautuminen.

	Sähkö (%)	Kaukolämpö (%)	Yhteensä kWh
Koulu A	72,2 %	27,8 %	907 382
Koulu B	29,4 %	70,6 %	1 507 471
Koulu C	41,3 %	58,7 %	1 739 246
Päiväkoti A	49,8 %	50,2 %	468 448

Koulu A:n rakentamisvaiheessa kaukolämmön hyödyntäminen aloitettiin suhteellisen myöhään, minkä vuoksi sitä kului maltillisesti. Muissa kohteissa kaukolämmön osuus on ollut sähkönkulutusta suurempi. Sähkönkulutus aloitetaan uudisrakennuksessa aina ennen kaukolämpöä, mutta niinä kuukausina kun kulutetaan molempia energiamuotoja, kaukolämpöä kuluu tyypillisesti huomattavasti enemmän, mikä nostaa kaukolämmön osuuden tavanomaisessa rakentamisessa sähkön yläpuolelle.

### 6.3 Toteutunut energiankulutus asuinkerrostalokohteessa

Tarkastellaan erään asuinkerrostalohankkeen rakentamisvaiheen energiankulutusta. Kohde on neljästä asuinkerrostalosta koostuva kokonaisuus Tuusulassa. Rakennukset ovat kuusi- ja seitsemänkerroksisia, nykyrakentamiselle tavanomaisia betonielementtirunkoisia asuinkerrostaloja. Kohteen rakentamisvaiheen kesto oli 22 kuukautta ja rakennukset valmistuivat tammikuussa 2022. Kuvassa 11 on esitetty kohteen rakentamisvaiheen kuukausitasoinen energiankulutus.



Kuva 11. Tarkasteltavan asuinkerrostalon rakentamisvaiheen kuukausitasoinen energiankulutus.

Kohteen rakentamisvaiheen alussa, huhtikuusta syyskuuhun, kului ainoastaan sähköenergiaa. Syksyn edetessä sähkön lisäksi hyödynnettiin nestekaasua ja kaukolämpöä rakennuksen lämmitystarpeiden täyttämiseksi. Nestekaasun hyödyntäminen lopetettiin huhtikuussa 2021, jonka jälkeen työmaan lämmitykseen käytettiin vain kaukolämpöä. Lisäksi työmaalla on kulunut polttoöljyä ja dieseliä. Taulukossa 12 esitetään työmaalla kuluneiden energiamuotojen määrät.

Taulukko 12. Tarkasteltavan asuinkerrostalon rakentamisvaiheen energiankulutustiedot.

Energiamuoto	Kulunut energia (kWh)	Osuus
Sähkö	579 130	31,5 %
Kaukolämpö	1 059 920	57,6 %
Nestekaasu	187 190	10,2 %
Polttoöljy	900	0,05 %
Diesel	12 320	0,7 %
<b>Yhteensä</b>	<b>1 839 460</b>	

Työmaalla kuluneesta energiasta suurin osa oli kaukolämpöä, jota kului noin 58 % kokonaisenergiankulutuksesta. Kokonaiskulutus oli 1 839,5 MWh, josta muodostuva ominaisenergiankulutus on 189,6 kWh/nm<sup>2</sup>. Energiankulutukset ja fossiilisten polttoaineiden tarkka dokumentointi viittaa siihen, että Taulukossa 12 todetut kulutusmäärät vastaavat todellista työmaalla käytettyä energiamäärää.

Rakentamisvaiheessa muodostunut hiilijalanjälki on 299 182 kgCO<sub>2</sub>e, ja ominaispäästö 30,8 kgCO<sub>2</sub>e/nm<sup>2</sup>. Realistisen energiatiedon perusteella voidaan päätellä, että ominaispäästön tarkkuus on korkea, ja virhemarginaali todennäköisesti pieni. Näin ollen kohteen rakentamisvaiheen hiilijalanjälki olisi YM-menetelmän mukaiseen asuinkerrostalojen työmaatoimintojen ominaispäästöön (46 kgCO<sub>2</sub>e/nm<sup>2</sup>) verrattuna 34 % vähäisempi.

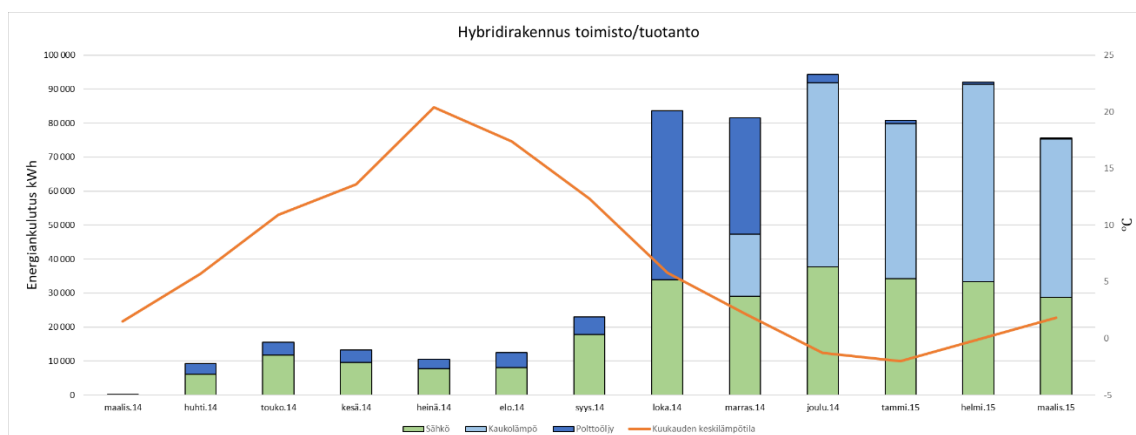
Tutkimustulos on samaa suuruusluokkaa kappaleessa 3.5 lasketun aiempaan tutkimustulokseen perustuvan tuloksen kanssa, mikä lisää epäilyä YM-menetelmän asuinkerrostalojen työmaatoiminnoista muodostuvan hiilijalanjäljen taulukkoarvon oikeellisuutta kohtaan. Tuloksesta on lisäksi huomattavissa, että tarkastellun asuinkerrostalokohteen ominaispäästö mukailee opetusrakennuksille laskettua ominaispäästöä, mikä viittaisi siihen, että tilakokojen vaikutus tarvittavaan energiamäärään on aiemmin ajateltua vähäisempi.

#### **6.4 Toteutunut energiankulutus toimisto-/tuotantorakennuksessa**

Viimeinen rakennustyyppi jolle SYKE:n rakentamisen päästötietokanta tarjoaa, on toimistorakennukset. Toimistorakennusten työmaatoimintojen ominaispäästöjen taulukkoarvo on 78 kgCO<sub>2</sub>e/nm<sup>2</sup>. Arvo on tässä tutkimuksessa tarkasteltuihin kohteisiin verrattuna erittäin korkea. Tämän vuoksi on epätodennäköistä, että niiden rakennustyyppien ominaispäästö, jotka ovat SYKE:n taulukkoarvojen ulkopuolella on toimistorakennusten taulukkoarvoa suurempi. Tätä voitaisiin pitää siis taulukkoarvoihin perustuvassa laskennassa työmaatoimintojen hiilijalanjäljen maksimiarvona.

Viimeisenä uudiskohteenä tarkastellaan hybridirakennusta, joka koostuu pääosin toimisto- ja tuotantotiloista. Rakennus on valmistunut maaliskuussa 2015, mikä tekee siitä muihin työssä tarkasteluihin uudiskohteisiin verrattuna hieman vanhemman.

Rakennuksessa on kolme kerrosta, ja sen runko on valmistettu betonielementeistä. Kuvassa 12 on esitetty kohteen rakentamisvaiheen kuukausitasoinen energiankulutus.



Kuva 12. Tarkasteltavan hybridirakennuksen rakentamisvaiheen kuukausitasoinen energiankulutus.

Kohteen rakentamisvaihe kesti 13 kuukautta, mikä on muihin tarkasteltuihin uudiskohteisiin verrattuna lyhyt. Tuotantorakennuksien kohdalla tämä on kuitenkin tyypillinen rakentamisaika yksinkertaisten rakenteiden vuoksi. Rakentamisvaiheen alussa työmaalla kului sähköä valaistukseen, työmaakonttien lämmittämiseen sekä polttoöljyä työmaakoneiden operointiin. Rakennuksen vaippa saatiin valmiiksi lokakuussa 2014, minkä kohdalla on huomattavissa merkittävä energiankulutuksen kasvu. Lokakuussa käytetty kasvanut polttoöljyn määrä viittaa polttoainekäyttöisten lämmittimien hyödyntämiseen sisätyövaiheen ensimmäisinä kuukausina. Kaukolämpö on kytketty päälle marraskuun loppupuolella kyseisen kuukauden jatkuvasta suuresta polttoöljyn kulutuksesta päätellen. Lopun rakentamisvaiheen polttoöljyn kulutus vähenee huomattavasti, mikä viittaa työmaakoneiden operoimisen kulutuksiin.

Kohteen työmaatoimintojen kokonaisenergiankulutus oli 591 910 kWh, josta muodostuva ominaisenergiankulutus oli 219,4 kWh/nm<sup>2</sup>. Ominaisenergiankulutus on muihin työssä tarkasteltuihin uudiskohteisiin verrattuna maltillisesti tyypillistä korkeampi. Energiamuotojen osuudet on esitetty Taulukossa 13.

Taulukko 13. Tarkasteltavan hybridirakennuksen rakentamisvaiheen energiankulutustiedot.

Energiamuoto	Kulunut energia (kWh)	Osuus
Sähkö	258 228	43,6 %
Kaukolämpö	222 660	37,6 %
Polttoöljy	111 022	18,8 %
Yhteensä	591 910	

Suurin osa kohteen rakentamisvaiheen energiankulutuksesta oli sähköä, jota kului noin 44 prosenttia kokonaisenergiankulutuksesta. Prosentuaalisesti polttoaineita kului myös tässä kohteessa tutkimuskohteista eniten. Suuri polttoöljyn kulutus vaikuttaa kaukolämmön tarpeen vähenemiseen sekä suurempaan työmaalla syntyvien kasvihuonekaasujen määrään.

Kohteen työmaatoiminnoista muodostunut kasvihuonekaasujen päästömäärä on 111 183 kgCO<sub>2</sub>e. Tätä kuvaava ominaispäästö on 41,2 kgCO<sub>2</sub>e/nm<sup>2</sup>. Ominaispäästö on tarkasteltujen kohteiden laajuudessa suurin johtuen pääosin merkittävästä suuripäästöisten fossiilisten energialähteiden käytöstä. Koska kohde ei ole pelkkä toimistorakennus, on epärealistista verrata tutkimuksen mukaista ominaispäästöä rakentamisen päästötietokannan taulukkoarvoon. On silti erittäin epätodennäköistä, että vaikka tarkastelussa voitaisiinkin erotella ainoastaan toimisto-osan ominaispäästö, se vastaisi yllä mainitun taulukkoarvon suuruusluokkaa. Tässäkin tapauksessa voidaan siis riittävällä tarkkuudella todeta, että rakentamisen päästötietokannan taulukkoarvo toimistorakennusten rakentamisvaiheen ominaispäästölle on liian suuri.

## 6.5 Toteutunut energiankulutus peruskorjaushankkeissa

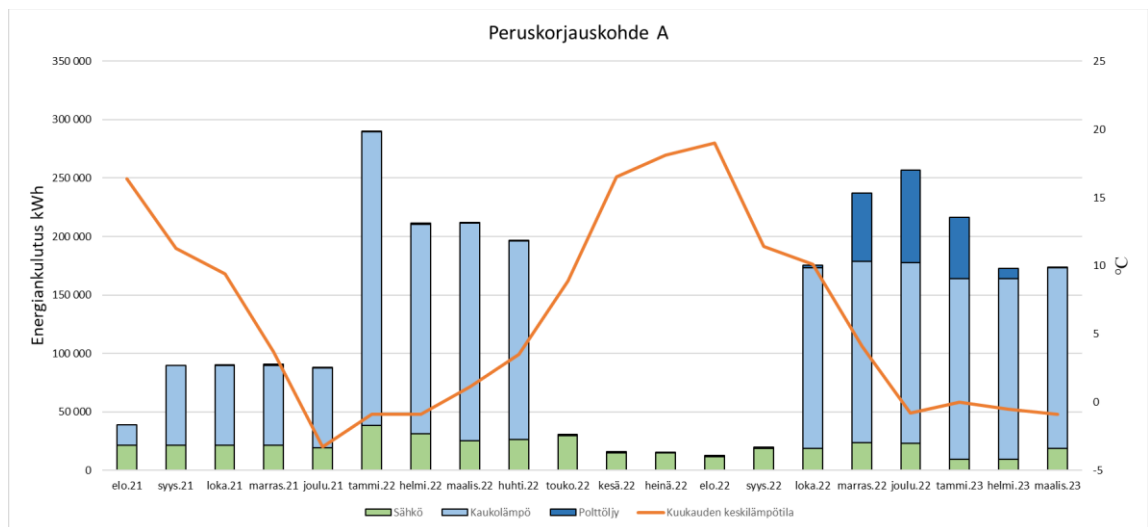
Korjausrakentamisen rakentamisvaiheessa muodostuvaa hiilijalanjälkeä on haastava yleistää korjaustoimien laajuuden vaihtelevuuden vuoksi. Tästä syystä peruskorjauskohteilla ei ole YM-menetelmän mukaisessa laskennassa omia taulukkoarvoja, vaan työmaatoimintojen hiilijalanjälki arvioidaan tarkasteltavan rakennustyyppin uudisrakentamisen taulukkoarvojen mukaan. Tämä johtaa lähes aina todellisuutta suuremman rakentamisvaiheen kasvihuonekaasupäästön ilmoittamiseen.

Tässä kappaleessa tarkastellaan kolmen peruskorjaushankkeen energiankulutuksia sekä näistä muodostuvaa hiilijalanjälkeä. Kohteista kaksi on toimistorakennuksia ja yksi on

opetusrakennus. Tutkimuksen tarkoituksena on löytää karkea arvio peruskorjaushankkeiden työmaatoimintojen tyypillisestä hiilijalanjäljestä.

### 6.5.1 Peruskorjauskohde A

Kohde on Turussa sijaitseva seitsemänkerroksinen toimistorakennus, jonka peruskorjaus valmistui maaliskuussa 2023. Hankkeeseen kuului tilamuutoksia, julkisivujen uusimisia ja korjauksia, kantavien rakenteiden aukotuksia sekä pihakannen uusimista. Kyseessä on laaja peruskorjaushanke, jonka rakentamisvaihe kesti 20 kuukautta. Rakentamisvaiheen kesto vastaa tämän kokoisen uudisrakentamiseen kuluvaan aikaan. Kuvassa 13 esitetään peruskorjauskohteen kuukausitasoinen energiankulutus.



Kuva 13. Peruskorjauskohde A korjauksen rakentamisvaiheen kuukausitasoinen energiankulutus.

Kuvasta 13 voidaan todeta, että uudiskohteista eroavasti, rakentamisvaiheen alussa kuluu myös kaukolämpöä sisäilman lämmittämiseen. Sähkönkulutus on samaa suuruusluokkaa lähes koko rakentamisajan. Kaukolämmön kulutus puolestaan vaihtelee suuresti ulkolämpötilan mukaan. Rakentamisvaiheen loppupuolella työmaalla kului myös polttoöljyä.

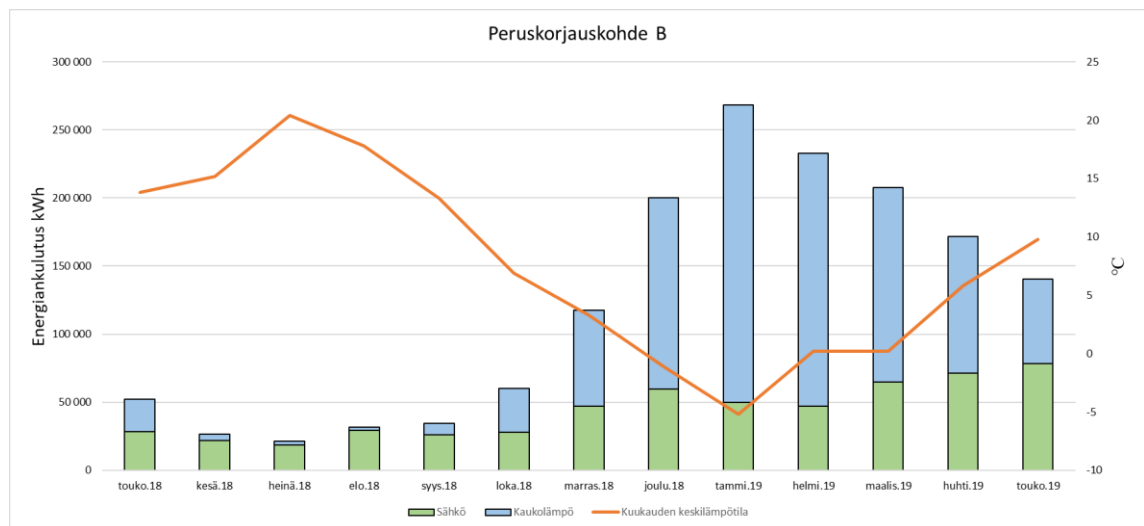
Työmaatoimintojen kokonaisenergiankulutus oli 2 635,4 MWh, ja ominaisenergiankulutus 201,5 kWh/nm<sup>2</sup>. Pääosa energiankulutuksesta oli kaukolämpö, jonka osuus kokonaiskulutuksesta oli noin 76 %. Työssä tarkasteltuihin uudiskohteisiin verrattuna kaukolämmön osuus on suuri, mikä on oletettua kohteessa, jossa

kaukolämpöä kuluu lähes koko rakentamisvaiheen ajan. Kulutuksesta sähköä oli noin 16 % ja polttoöljyä 8 %.

Rakentamisvaiheen energiankulutuksesta muodostuva hiilijalanjälki on 404 958 kgCO<sub>2</sub>e, josta muodostuva ominaispäästö on 31,0 kgCO<sub>2</sub>e/nm<sup>2</sup>. Ominaispäästö on samaa suuruusluokkaa tarkasteltujen uudiskohteiden kanssa ja 60 % rakentamisen päästötietokannan toimistorakennuksien taulukkoarvoa pienempi. Peruskorjauksen rakentamisvaiheen hiilijalanjäljen tulisikin olla maltillisesti uudiskohteen arvoa pienempi tavanomaista lyhyemmän rakentamisajan vuoksi, mutta ero taulukkoarvoon on tässäkin kohteessa valtava.

### 6.5.2 Peruskorjauskohde B

Toinen tarkasteltava peruskorjauskohde on myös toimistorakennus. Kohde on Helsingissä sijaitseva seitsemänkerroksinen rakennus, jonka peruskorjaus valmistui toukokuussa 2019. Kohteen peruskorjaus kohdistui sisä rakenteiden, kuten väliseinien ja tilapintojen, sekä ikkunoiden ja lasiseinien uusimiseen. Lisäksi kohteessa uusittiin talotekniikkaa. Peruskorjauksen rakentamisvaihe kesti 13 kuukautta. Kuvassa 14 esitetään peruskorjauskohde B:n rakentamisvaiheen kuukausittainen energiankulutus.



Kuva 14. Peruskorjauskohde B korjauksen rakentamisvaiheen kuukausittainen energiankulutus.

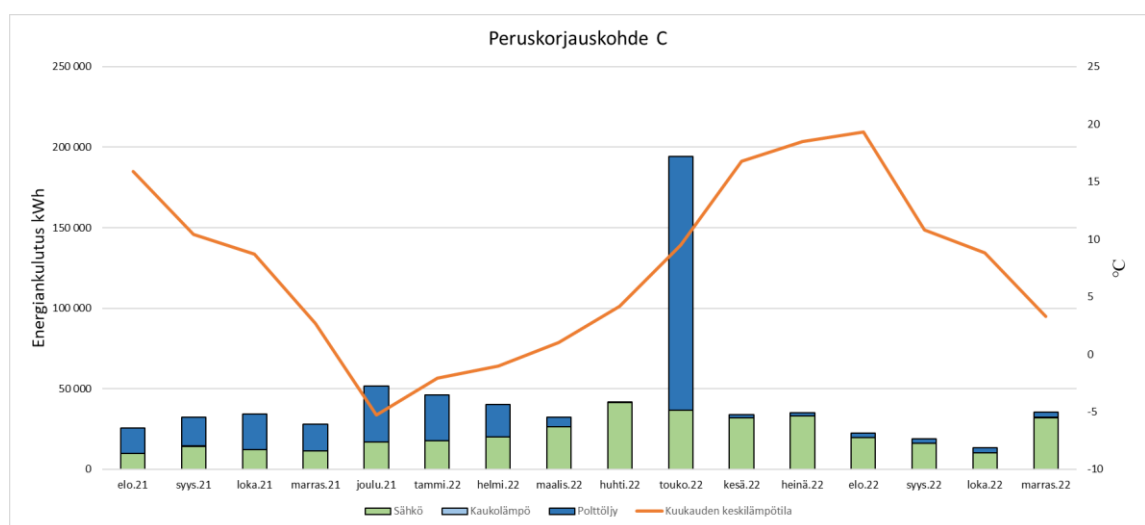
Uudiskohteista eroavasti ja edellisen peruskorjauskohde B:n tavoin rakentamisvaiheen alussa kului sähköä lisäksi kaukolämpöä. Rakentamisvaihe alkoi kesän kynnyksellä, minkä vuoksi lämmitystarve on ollut vähäistä. Kaukolämmönkulutus kasvoi syysstä

eteenpäin ja oli korkeimmillaan tammikuussa. Peruskorjauksen rakentamisvaiheen kokonaisenergiankulutus oli 1 565,1 MWh, josta suurin osa, noin 64 prosenttia oli kaukolämmön kulutusta ja loput sähköä. Rakentamisvaiheen ominaisenergiankulutus oli 156,3 kWh/nm<sup>2</sup>.

Peruskorjauksen työmaatoiminnoista muodostunut hiilijalanjälki on 244 221 kgCO<sub>2</sub>e, ja ominaispäästö 24,4 kgCO<sub>2</sub>e/nm<sup>2</sup>. Työmaatoimintojen energiankulutuksessa ei ilmoitettu polttoaineiden kulutusta, mikä todennäköisesti johtuu polttoaineiden dokumentaation puutteesta. Mikäli laskettuun ominaispäästöön lisätään arvioitu 20 % lisäys mahdollisista polttoaineista, asettuu ominaispäästö arvoon 29,3 kgCO<sub>2</sub>e/nm<sup>2</sup>. Laskettu ominaispäästö on noin 62 % rakentamisen päästökannan taulukkoarvoa pienempi.

### 6.5.3 Peruskorjauskohde C

Viimeinen tarkasteltava peruskorjauskohde on opetusrakennus. Kohteen peruskorjaus kohdistui vanhan koulurakennuksen modernisoitiin, jossa sisätiloista muokattiin toimivia ja joustavia opetustiloja. Kohde on nykyrakentamisen standardeilla korkea, ja se käsittää neljä maanpäällistä kerrosta. Peruskorjauksessa uusittiin pääasiassa kohteen ikkunat, tilanjako-osat, tilapinnat sekä talotekniikka. Hankkeen rakentamisvaihe aloitettiin elokuussa 2021, ja se valmistui marraskuussa 2022. Rakentamisvaiheen kesto oli 16 kuukautta. Kuvassa 15 esitetään peruskorjauksen rakentamisvaiheen kuukausitasoinen energiankulutus.



Kuva 15. Peruskorjauskohde C korjauksen rakentamisvaiheen kuukausitasoinen energiankulutus.

Muista työssä tarkastelluista kohteista poiketen, kohteen lämmitys on toteutettu pääsääntöisesti polttoöljykäyttöisillä lämmittimillä. Polttoöljyä kului melko tasaisesti toukokuuhun 2022 asti, jolloin Kuvasta 15 on huomattavissa merkittävä kulutuksen kasvaminen. Ulkolämpötila ei viittaa kasvaneeseen lämmitystarpeeseen, joten todennäköisesti kyseessä on jäljellä olevan rakentamisvaiheen tarpeisiin tilattu polttoainemäärä, joka on kirjattu toukokuun kulutukseksi.

Rakentamisvaiheen kokonaisenergiankulutus oli 685 818 kWh. Energiankulutus jakautui tasaisesti kuluneen sähkön ja polttoöljyn välillä. Kohteen ominaisenergianpäästö oli 100,0 kWh/nm<sup>2</sup>. Mielenkiintoisesti rakentamisvaiheessa ei kulunut juurikaan kaukolämpöä, vaikka kohde on ollut kaukolämpöliitäntään kytkettynä.

Energiankulutuksesta muodostunut hiilijalanjälki on 153 063 kgCO<sub>2</sub>e, ja ominaispäästö 22,3 kgCO<sub>2</sub>e/nm<sup>2</sup>. Ominaispäästö on hieman opetusrakennusten laskettua päästöjen keskiarvoa pienempi. Tämä on linjassa työssä mainitun arvion kanssa, että peruskorjauskohteen ominaispäästö on maltillisesti uudiskohteen vastaavaa arvoa vähäisempi. Tässä kohteessa päästövähennys uudiskohteen tyypilliseen tasoon on noin 15 %.

#### 6.5.4 Peruskorjauskohteiden rakentamisvaiheen ominaispäästö

Peruskorjauskohteiden energiankulutustottumuksia yhdisti uudiskohteista poiketen rakentamisvaiheen alun lämmitystarve. Tämä johtuu luonnollisesti siitä, että korjaushankkeissa rakennus on rakentamisvaiheen alussa ummessa. Tarkastelluissa peruskorjauskohteissa ominaisenergiankulutus oli hieman uudiskohteita matalammalla tasolla. Taulukossa 14 on esitetty peruskorjauskohteiden energiankulutus ja hiilijalanjälki.

Taulukko 14. Yhteenveto tarkasteltujen peruskorjauskohteiden energiankulutuksen ja hiilijalanjäljen tunnusluvuista.

	Ominaisenergiankulutus kWh/nm <sup>2</sup>	Ominaispäästö kgCO <sub>2</sub> e/nm <sup>2</sup>	Ominaispäästö/ kuukausi
Peruskorjauskohde A	201,5	31,0	1,55
Peruskorjauskohde B	156,3	24,4	1,88
Peruskorjauskohde C	100,0	22,3	1,39

Peruskorjauskohteiden ominaispäästö on kaikkien tarkasteltujen kohteiden osalta vähäisempi kuin tutkittujen vastaavien rakennustyyppien sekä merkittävästi rakentamisen päästötietokannan taulukkoarvoja pienempi. Peruskorjauskohteiden työmaatoiminnoista muodostuvan hiilijalanjäljen arvioiminen ilman mitattua energiankulutustietoa on todennäköisesti täsmällisin laskea kohteen energiatodistuksen mukaiseen kulutukseen perustuen. Energiatodistuksessa ilmoitettu vuosittainen energiankulutus tulee skaalata rakentamisvaiheeseen kuluvan ajan mukaan.

## **6.6 Sähköenergian tuottaminen työmaalla**

Rakennustyömaan energiankulutus on suurta, ja on houkuttelevaa innovoida menetelmiä tuottaa energia vähäpäästöisesti ja kustannustehokkaasti työmaalla. Tapoja tuottaa energiaa itsenäisesti työmaalla on useita, joista osa on jo laajassa käytössä.

### **6.6.1 Generaattorit**

Aggregaatit ja generaattorit ovat olleet yksinkertainen ja helppo tapa muuttaa hiilivetyisiä polttoaineita sähköenergiaksi. Generaattorin hyötysuhde on kuitenkin vain noin kolmanneksen polttoaineen energiasisällöstä, mikä johtaa siihen, että generaattorilla tai aggregaatilla tuotettu sähköenergia on moninkertaisesti sekä suuripäästöisempiä että kalliimpia kuin sähköverkosta saatava energia.

Biopolttoaineen käyttö on lisääntymässä polttomoottoreissa ja sitä voidaan hyödyntää myös rakennustyömaan generaattoreissa. Biopolttoaineen hiilijalanjäljellinen etu polttoöljyyn tai dieseliin katsottuna on sen raaka-aine tuotannossa sitoutunut hiili. Biopolttoaine valmistetaan biomassasta eli eloperäisistä kasveista (Työ- ja elinkeinoministeriö 2022). Kasvit sitovat elinkaarensa aikana hiilidioksidia, mikä on biopolttoaineelle hiilijalanjälkeä vähentävä tekijä. Biopolttoainetta käytettäessä moottorin pakokaasuna poistuu jokseenkin samansuuruinen määrä hiilidioksidia kuin ennenkin, mutta hiilen sidonnan vuoksi biopolttoainetta pidetään käyttövaiheessa hiilineutraalina (Lipasto 2022). Suomen lainsäädäntö ohjaa biopolttoaineen käytön lisäämistä, minkä vuoksi sen käyttö tulee lisääntymään tulevaisuudessa ja merkitys hiilidioksidin vähentämiseen tulee kasvamaan. Tälläkin hetkellä biopolttoaineita hyödyntämällä saavutetaan merkittäviä päästövähennyksiä.

### 6.6.2 Aurinkosähkö

Aurinkovoimaa voidaan pitää oman vihreän energiantuotannon kulmakivenä ja kansikuvana. Aurinkopaneeleilla voitaisiin hyödyntää kattamaan osittain työmaan suurta sähkönkulutusta hiilineutraalisti. Aurinkopaneelisen ongelmaksi rakentamisvaiheessa muodostuu kuitenkin niiden heikko tuotanto talvella, jolloin sähkön ja valaistuksen tarve on työmaalla suurin. Tästä huolimatta aurinkopaneelit tuottavat maaliskuusta syyskuuhun sähköä hyvin, minkä vuoksi niiden hyödyntäminen on varteenotettava ratkaisu varsinkin sellaisilla työmailla, jotka ovat sähköverkon ulottumattomissa.

Paneelien asennus työmaalla olisi työlästä, joten vaihtoehtoisena ratkaisuna työmaa voisi vuokrata aurinkoenergiakontteja. Esimerkiksi Cramo Oyj tuottaa palvelua, jossa työmaille vuokrataan modulaarisia hybridiaurinkogeneraattoreita eli aurinkoenergiaa tuottavia kontteja. Cramon valmistaa kahta konttikokoa, joista suurempi soveltuu paremmin työmaan tarkoitukseen. Kontissa on 20 aurinkopaneelia, jotka ilman dieselgeneraattoria tuottavat 8 kW:n maksimitehon. (Cramo 2021). Tämä vastaa noin 6800 kWh vuodessa, mikä kattaisi aiemmin läpikäydyssä Hämäläisen tutkimuksessa noin 2,5 % rakennustyömaan keskimääräisestä kokonaissähkötarpeesta. Osuus tuntuu liian pieneltä, jotta vaihtoehtoa kannattaisi hyödyntää suuremmalla työmaalla, varsinkin jos energiaa on saatavilla sähköverkosta. Cramon kontteja voidaan hyödyntää myös hybridiperiaatteella, jossa dieselgeneraattorin kanssa saadaan 48 kW:n maksimiteho. Tämä on jo huomattavasti käytännöllisempi sähkömäärä, mutta toisaalta pienentää aurinkosähköstä saatavan ympäristöhyödyn merkitystä.

### 6.6.3 Bioenergia

Toinen mahdollinen tapa hyödyntää uusiutuvia energiamuotoja työmaalla on puun polttaminen. Puuta polttamalla voidaan korvata fossiilisia polttoaineita sähkö- ja lämmitysenergian tuotannossa. Volter on CHP-järjestelmiä (combined heat and power -järjestelmiä) valmistava yritys. Nämä hyödyntävät energiantuotannossaan puulastuja, joita kuluu saman energiamäärän tuottamiseen massaltaan kaksinkertainen määrä öljyyn verrattuna. Volterin järjestelmät tuottavat 40 kW sähköenergiaa, 100 kW lämmitysenergiaa vetenä sekä 20 kW lämmitysenergiaa ilmaan. (Volter 40 outdoor 2022). Yhdellä työmaalle tuotavalla Volter outdoor-järjestelmällä voitaisiin kattaa hiilineutraalisti Hämäläisen tutkimuksen mukaisen asuinrakennuksen työmaavaiheen

kaukolämmön ja sähkön kulutus. Tällöin työmaatoimintojen hiilijalanjälki laskisi 64 %. Järjestelmän hyödyntäminen kuitenkin vaatisi jatkuvaa polttoaineen lisäämistä ja sen suuren määrän varastoimista työmaalla.

## 6.7 YM-menetelmän ulkopuoliset vaikutusmahdollisuudet

Ympäristöministeriön mukaisessa hiilijalanjäljen laskennassa ei saa huomioida muun muassa paikkakuntaisia päästökertoimia energiamuodoille, vihreästi tuotetun sähkön päästövähennystä eikä päästöjen kompensointia. Vaikka näitä keinoja ei YM-menetelmän mukaisessa hiilijalanjäljen arvioinnissa voida hyödyntää, se ei tarkoita, etteikö näillä oikeasti olisi positiivisia ympäristövaikutuksia. Tarkastellaan päästövähennysmahdollisuuksia, joita on vihreän energian hankkiminen ja päästökompensointi tuovat.

### 6.7.1 Vihreän energian hankinta

Vihreällä eli uusiutuvalla energialla tarkoitetaan niiden luonnonvarojen avulla tuotettua energiaa, jotka uusiutuvat itsestään lähes loputtomasti (Mikä ihmeen vihreä sähkö 2022). Näillä resursseilla tuotetun energian ajatellaan olevan hiilipäästöttömiä, ja ovat näin erinomainen tapa edistää hiilineutraaliutta sekä rakennuksen käyttö- että rakentamisvaiheessa. Työ- ja elinkeinoministeriön (2022) mukaan Suomessa käytetyn uusiutuvan energian osuus energian loppukulutuksesta on yli 40 %. Merkittävimmät Suomessa hyödynnetyt uusiutuvan energian lähteet ovat bioenergia, vesivoima, tuulivoima ja maalämpö (Työ- ja elinkeinoministeriö 2022). Laki uusiutuvan energian tuotantolaitosten lupamenettelyistä ja eräistä muista hallinnollisista menettelyistä (2020/1145) määrittää uusiutuvaksi energiaksi seuraavat luonnonvarat:

*”Uusiutuvalla energialla tuuli- ja aurinkoenergiaa, geotermistä energiaa, ympäristön energiaa, vuorovesi- ja aaltoenergiaa ja muuta valtamerienergiaa, vesivoimaa ja biomassaa sekä kaatopaikoilla ja jätevedenpuhdistamoissa syntyvää kaasua ja biokaasua, joka ei ole peräisin fossiilisista lähteistä.”*

Uusiutuva energia on lähes jokaisessa hiilijalanjäljen vähentämistä koskevassa ympäristöstrategiassa merkittävässä roolissa. Sen hankkiminen on todella yksinkertainen tapa vähentää hiilidioksidipäästöjä ilman suurta vaivaa ja investointia ja nykyään lähes jokainen suomalainen energiayhtiö tarjoaakin uusiutuvista lähteistä

tuotettua energiaa. Hiilineutraalin sähköenergian hyödyntäminen vähentää työmaatoimintojen hiilijalanjälkeä yli 20 %.

### 6.7.2 Päästöjen kompensointi

Hiilijalanjäljen kompensoinnilla tarkoitetaan aiheutetun päästömäärän kumoamista sitomalla tai vähentämällä vastaava määrä CO<sub>2</sub> päästöjä jossain muualla, mikä mahdollistaa suuren kuvan nollopäästöt vähentämättä oman toiminnan hiilijalanjälkeä. Päästöjen kompensointi tapahtuu tavanomaisesti päästöyksikköjen hankkimisella palveluntarjoajan kautta. Tällaisia palveluita on muun muassa kehittyviin maihin toteutettavat uusiutuvan energian tarjoajat, metsien suojele hävittämiseltä sekä uusien alueiden metsittäminen. Päästöjä voidaan kompensoida myös hankkimalla Euroopan päästökaupasta hiilidioksiditonnejä, mikä vähentää tehtaille myytävää päästömäärää. (Landström M. 2020).

Päästöjen kompensoinnin luotettavuus perustuu standardeihin, joita palveluntarjoajien on noudatettava. Standardien mukaan kiistattoman kompensaaion tapahtumiseksi kaupattavan päästövähennyksen on oltava todellinen, pysyvä, mitattavissa sekä sellainen, jota ilman projektin toteutusta ei olisi tapahtunut. Näiden todentaminen voi kuitenkin osoittautua hankalaksi, sillä esimerkiksi istutetun metsän pysyvyyttä on vaikea ennustaa. (Landström M. 2020).

Palveluntarjoajasta ja päästöjen kompensointitavasta riippuen Suomessa hiilidioksiditonnin kompensoinnin hinta vaihtelee noin 25–50 euron välillä. CO<sub>2</sub>-data-tietokannassa esitettyjen hiilijalanjäljen taulukkoarvoihin perustuen saadaan rakentamisvaiheen hiilipäästöjen kompensoinnin hinnaksi 1,85–5,25 €/nm<sup>2</sup> riippuen rakennustyyppistä sekä palveluntarjoajan hintapyyntöstä. Kaiken kaikkiaan hiilijalanjäljen kompensointi kertaluontoisesti tulee merkittävästi halvemmaksi kuin päästöjen orgaaninen vähentäminen päästölähteellä, mutta ei tuo ongelmaan kestävä ratkaisua.

## 7 JOHTOPÄÄTÖKSET

Rakennusurakoitsija voi vaikuttaa hankeensa rakentamisvaiheen hiilijalanjälkeen sekä positiivisesti, että negatiivisesti. Tuotevaiheen osalta urakoitsija voi vaikuttaa materiaalien ja tuotteiden valinnoilla. Vähäpäästöisten rakennustuotteiden valinnalla voidaan vähentää hankkeen elinkaaren hiilijalanjälkeä yli 20 %. Tämä tarkoittaa sitä, että vähähiilisiä tuotteita hyödyntämällä voidaan useassa tapauksessa vähentää tuotevaiheen päästöjä enemmän, kuin mitä rakentamisvaiheessa (A4 & A5) niitä syntyy. Tuotevaiheen valintoja kannattaa siis päästövähennyksen tehokkuuden nimissä pitää erityisen tärkeänä. Kasvihuonekaasujen mielessä ympäristöystävällisillä rakennusmateriaaleilla on kuitenkin tyypillisesti kustannuksia kasvattava vaikutus, mikä voi olla esteenä näiden hyödyntämiselle.

YM-menetelmässä hyödynnetään ominaispäästöä  $27 \text{ kgCO}_2/\text{nm}^2$  työmaan kuljetuksille. Tutkimuksessa huomattiin betonituotteiden ja maaosien olevan suurin vaikuttava tekijä tämän luvun muodostumiseen. Näiden kuljetusetäisyyksiin ja materiaaleja kuljettavien ajoneuvojen energiamuotojen optimoinnilla päästään merkittäviin päästövähennyksiin. Urakoitsijan tulisi hiilijalanjäljen näkökulmasta suosia läheltä kuljetettavia materiaaleja, ja sähköllä tai biopolttoaineilla toimivia kuorma-autoja hyödyntäviä kuljetusyriytyksiä. YM-menetelmän työmaakuljetusten ominaispäästö on lisäksi melko suuri, mikä tarkoittaa sitä, että mikäli urakoitsija seuraa materiaalin kuljetusetäisyydet ja hiilijalanjälkilaskenta toteutetaan perustuen toteutuneisiin kuljetusmatkoihin, on laskennan tulos suurella todennäköisyydellä taulukkoarvoa pienempi. Tämä siis johtaisi raportoinnissa pienempiin päästöihin ilman suurempia toimenpiteitä.

Työmaatoimintojen osalta rakennusurakoitsijalla on useita vaikuttaa työmaalla kuluvan energian määrään ja siitä muodostuvaan hiilijalanjälkeen. Vähähiilisyiden edistämässä erityisen tärkeää hyödyntää matalan päästökertoimen energiamuotoja, ja pyrkiä kuluttamaan mahdollisimman vähän energiaa. Fossiilisten polttoaineiden sijaan tulisi työmaan lämmityksessä käyttää kauko- tai maalämpöä. Työmaalla käytettävien koneiden osalta tulisi harkita matalan polttoaineen päästökertoimen vaihtoehtoja, kuten sähköllä, biopolttoaineilla tai vedyllä operoitavia laitteita. Lisäksi tapauskohtaisesti voidaan harkita työmaalla tuotetun energian hyödyntämistä generaattorien ja aurinkopaneelien avulla.

Kuluvan energian määrään voidaan vaikuttaa optimoimalla työmaan valaistus siten, ettei valaistus ole talvisin päällä vuorokauden ympäri. Työmaa voidaan myös ajoittaa siten, että rakennusajan talvikuukausien määrä on mahdollisimman pieni. Tällä saavutetaan mahdollisimman vähäinen lämmitystarve, mikä johtaa pienempään energiankulutukseen ja työmaatoimintojen hiilijalanjäljen määrään. Tutkimuksessa myös huomattiin, että todellisilla kulutustiedoilla laskettaessa päästään YM-menetelmän mukaista taulukkoarvoa pienempi tuloksiin sekä uudis-, että peruskorjauskohteiden osalta. Rakennusurakoitsija voi myös harkita YM-menetelmän ulkopuolisia vaikutusratkaisuja, kuten vihreästi tuotetun sähkön tai päästöjen kompensoinnin hankkimista. Näiden tuomaa ympäristöhyötyä ei kuitenkaan voida käyttää YM-menetelmän mukaisessa hiilijalanjäljen arvioinnissa ja ovat enemmänkin sisäiseen raportointiin tarkoitettuja lukuja.

## 8 YHTEENVETO

Tässä työssä tutkittiin rakennusurakoitsijan vaikutusmahdollisuuksia rakennuksen hiilijalanjälkeen. Tutkimuksen tarkoituksena oli tunnistaa rakennushankkeen merkittävimmät hiilijalanjälkeen vaikuttavat tekijät, sekä esittää ratkaisuja ja toimenpiteitä näiden aiheuttamien kasvihuonekaasujen vähentämiseksi. Lisäksi työssä tutkittiin YM-menetelmässä hyödynnettäviä rakentamisvaiheessa muodostuvien kasvihuonekaasujen taulukkoarvoja. Tässä pyrittiin selvittämään taulukkoarvojen oikeellisuutta, sekä esittämään vaihtoehtoisia ominaispäästölukuja kohdekohtaisten energiankulutustietojen kautta.

Työssä tarkasteltiin merkittävimpiä tekijöitä tuotevaiheen (A1-A3) hiilijalanjälkeen. Tutkimuksessa todettiin, että suurimmat kasvihuonekaasujen päästömäärät muodostuvat tavanomaisesti rakennuksen betoni- ja teräsrakenteista. Havaittiin, että tavanomaista elementtirakentamista edustavassa asuinkerrostalossa betonielementtien tuotevaiheen hiilijalanjälki käsittää noin 46 % rakennuksen tuotevaiheen päästömäärästä. Tähän voidaan vaikuttaa hankkimalla esimerkiksi Parma Oy:n vähähiilisillä betonielementeillä, joilla saavutetaan noin 17,2 % päästövähennys asuinkerrostalon tuotevaiheessa. Teräsrakenteet ovat toimistorakennuksissa merkittävä tuotevaiheen päästölähde. Tarkastellussa toimistorakennuksessa huomattiin, että teräsrakenteiden osuus kohteen tuotevaiheen hiilijalanjäljestä on noin 25 %. Hankkimalla vähähiilisiä teräsrakenteita, kuten Peikko Group:in Deltabeam Green-teräspalkkeja tavanomaisten Deltapalkkien sijaa, mahdollistetaan noin 10 % päästövähennys toimistorakennuksen tuotevaiheessa. Lisäksi työssä tarkasteltiin muiden, maltillisesti vähemmän hiilijalanjäljen näkökulmasta merkittävien rakennusosien tuotevaiheen päästömääriä ja tuotevalintojen mahdollisuuksia päästövähennystalkoissa.

Rakentamisvaiheessa tutkittiin työmaakuljetuksien (A4) sekä työmaatoimintojen (A5) aiheuttamaa päästömäärää. Työmaakuljetuksien hiilijalanjälkitarkastelussa tunnistettiin ne rakennusosat, joiden massat muodostavat suurimman osan rakennuksen kokonaismassasta. Näistä merkittävimmit nousivat betonivalmisosat, valmisbetoni sekä maa-ainekset. Näiden kuljetusetäisyyksiä sekä kuljetukseen käytettävien ajoneuvojen polttoaineita tarkastelemalla ja vertaamalla selvitettiin, että työmaakuljetuksissa muodostuvaa hiilijalanjälkeä voidaan vähentää merkittävästi kuljetusetäisyyksiä lyhentämällä, ja suosimalla vähäpäästöisempiä polttoaineita.

Työmaatoimintojen selvittämiseksi työssä tarkasteltiin usean eri kohteen ja rakennustyyppin rakentamisvaiheen energiankulutusta ja käytettäviä energiamuotoja. Tarkasteltaviin uudiskohteisiin lukeutui yksi majoitusliikerakennus, yksi asuinkerrostalo, viisi opetusrakennusta sekä yksi toimisto/tuotantorakennus. Kuukausitasoisia energiankulutuksia tarkastelemalla havaittiin, että valtaosa työmailla kuluvasta energiasta on tyypillisesti sähköä ja kaukolämpöä. Näiden lisäksi työmailla kului polttoöljyä ja nestekaasua. Sähkön todettiin kuluvan pääasiallisesti työmaan valaistukseen sekä työmaakonttien lämmittämiseen. Kaukolämmön puolestaan havaittiin vaikuttavan pääasiallisesti rakennusten sisätyövaiheiseen lämmönkulutukseen. Fossiilisia polttoaineita hyödynnettiin tarvittaessa rakennuksen lämmittämiseen, sekä työmaakoneiden operoimiseen.

Asuinkerrostalokohteen työmaatoiminnoista muodostuvaksi ominaispäästökseen laskettiin  $30,8 \text{ kgCO}_2\text{e/nm}^2$ , jonka todettiin olevan noin 33 % rakentamisen päästötietokannan arvoa pienempi. Lasketun ominaispäästön huomattiin myös olevan samaa suuruusluokkaa aiemmissa tutkimuksissa todettujen energiankulutuksien kanssa, mikä nostaa luottamusta tuloksen oikeellisuudesta. Opetusrakennuksien ominaispäästöjen keskiarvoksi todettiin noin  $35,5 \text{ kgCO}_2\text{e/nm}^2$ , mikä on 41 % taulukkoarvoa vähäisempi. Viimeisenä tarkasteltiin toimisto- ja tuotanto-osista koostuvan hybridirakennuksen ominaispäästöä. Kohteen rakentamisvaiheen ominaispäästökseen laskettiin  $41,2 \text{ kgCO}_2\text{e/nm}^2$ . Tämän kohteen ominaispäästön vertaaminen toimistorakennuksien taulukkoarvoon on hieman kyseenalaista, sillä rakennus ei ominaisuuksiltaan ja rakentamisajaltaan vastaa tavanomaista toimistorakennusta. Rakennuksen työmaatoimintojen ominaispäästö oli tarkastelluista kohteista suurin, mikä on linjassa rakentamisen päästökannan työmaatoimintojen suuruusjärjestyksen kanssa.

Lopuksi tarkasteltiin peruskorjaushankkeissa muodostuvaa työmaatoimintojen hiilijalanjälkeä. Työssä tutkittiin kolmea peruskorjauskohdetta, joiden korjauksien ja uusimisien laajuus sekä rakentamisaika vaihtelivat. Tutkimuksessa huomattiin, että peruskorjauskohteiden työmaatoiminnoissa muodostuva ominaispäästö vastaa lähes uudishankkeiden tasoa. Tutkimuksessa ehdotettiin, että peruskorjauksen työmaatoimintojen hiilijalanjälki olisi ilman tarkkaa energiankulutusta yksinkertaisin laskea rakennuksen energiatodistukseen perustuen rakentamisajalle skaalattuna,

Lähes jokaisessa tarkastellussa uudisrakennuksessa ja peruskorjauskohteessa työmaatoimintojen ominaispäästö liikkui 30–35 kgCO<sub>2</sub>e/nm<sup>2</sup> luokassa. Tämä viittaisi siihen, että työmaatoiminnoissa muodostuva hiilijalanjälki olisi todellisuudessa merkittävästi rakentamisen päästötietokannan arvoa vähäisempi eikä olisi kovinkaan riippuvainen rakennustyypistä.

## LÄHTEET

08 Opetusrakennukset. 2018. Tilastokeskus. [Verkkodokumentti]. Saatavissa: [https://www2.stat.fi/fi/luokitukset/rakennus/rakennus\\_1\\_20180712/code/08/](https://www2.stat.fi/fi/luokitukset/rakennus/rakennus_1_20180712/code/08/) [Viitattu 27.11.2023].

Aurinkosähkö lisää vastuullista rakentamista – teho riittää isoillekin työkoneille, 2021. Cramo. [Verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.cramo.fi/fi/yritys/ajankohtaista/tiedotteet/aurinkosahko-lisaa-vastuullista-rakentamista--teho-riittaa-isoillekin-tyokoneille> [Viitattu 16.9.2022].

Betonin valmistus. 2023. Betoni. [Verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://betoni.com/tietoa-betonista/betoni-rakennusmateriaalina/betonin-valmistus/> [Viitattu 25.4.2023].

Biopolttoaineet ja Bionesteet, 2022. Työ- ja elinkeinoministeriö. [Verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://tem.fi/biopolttoaineet> [Viitattu 16.9.2022].

CO2-termit tutuiksi. 2023. OpenCO2.net. [Verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.openco2.net/fi/co2-tietoa> [Viitattu 21.11.2023].

DELTABEAM® Green puolittaa hiilijalanjäljen. 2023. Peikko Group. [Verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.peikko.fi/tuotteet/deltabeam/deltabeam-green/> [Viitattu 10.5.2023].

Earl T., Mathieu L., Cornelis S., Kenny S., Amblel C., Nix J. 2018. Analysis of long haul battery electric trucks in EU. European Federation For Transport and Environment (T&E). Saatavissa [https://www.transportenvironment.org/wp-content/uploads/2021/07/20180725\\_T&E\\_Battery\\_Electric\\_Trucks\\_EU\\_FINAL.pdf](https://www.transportenvironment.org/wp-content/uploads/2021/07/20180725_T&E_Battery_Electric_Trucks_EU_FINAL.pdf)

Fortum, 2020. Mikä on hiilijalanjälki ja miten pienennät sitä? [Verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://yhdedssa.fortum.fi/mika-on-hiilijalanjalki-ja-miten-pienennat-sita> [Viitattu 4.5.2022].

Hiilidioksidi CO<sub>2</sub>, 2022. Lipasto. [Verkkodokumentti]. Saatavissa: <http://lipasto.vtt.fi/liisa/co2s.htm> [Viitattu 16.9.2022].

Huckins S., 2019. You, too, can master value chain emissions. Greenhouse Gas Protocol. [Verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://ghgprotocol.org/blog/you-too-can-master-value-chain-emissions> [Viitattu 23.11.2023].

Häkkinen T., 2021. Transportation of building products (A4) (calculated in (kg CO<sub>2</sub>e/m<sup>2</sup>)) Background data. Suomen ympäristökeskus. [Verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://co2data.fi/reports/Process-transportation-of-building-materials.pdf> [Viitattu 30.8.2022].

Häkkinen T., Nibel S. & Birgisdottir H., 2021. Definition and methods for the carbon handprint of buildings. Ministry of the environment Finland & Danish housing and planning authority. Saatavissa: <https://ym.fi/documents/1410903/40549091/Raportti+-+Definition+and+methods+for+the+carbon+handprint+of+buildings.pdf/ed3c5535-c1b8-3beb-7765-ec0ee1f61443/Raportti+-+Definition+and+methods+for+the+carbon+handprint+of+buildings.pdf?t=1617775615867>

Hämäläinen J., 2012. Rakennustyömaan energiatutkimus. Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto. Rakennustekniikan diplomityö. [Verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.rakennusteollisuus.fi/globalassets/rakentamisen-kehittaminen/rakennustyomaan-energiatutkimus.pdf> [Viitattu 31.8.2022].

Ilmankosteus, 2022. Sääasema Joutsa. [Verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.ruunula.fi/template/pages/station/climate.php?var=H> [Viitattu 22.9.2022].

Kuukausitilastot, 2022. Ilmatieteen laitos. [Verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/kuukausitilastot> [Viitattu 22.9.2022].

Landström M., 2020. Sitra. Onko päästöjen kompensointi rahastusta? [Verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.sitra.fi/blogit/onko-paastojen-kompensointi-rahastusta/> [Viitattu 13.9.2022].

Mikä ihmeen vihreä sähkö, 2022. Väre. [Verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://vare.fi/sahkosopimus/vihrea-sahko/mika-ihmeen-vihrea-sahko/> [Viitattu 19.9.2022].

Motiva, 2022. Maalämpöpumppu, MLP. [Verkkodokumentti]. Saatavissa: [https://www.motiva.fi/koti\\_ja\\_asuminen/rakentaminen/lammitysjarjestelman\\_valinta/lammitysmuodot/maalampopumppu\\_mlp](https://www.motiva.fi/koti_ja_asuminen/rakentaminen/lammitysjarjestelman_valinta/lammitysmuodot/maalampopumppu_mlp) [Viitattu 9.9.2022].

Neste MY Renewable Diesel™. 2023. Neste. [Verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.neste.com/products/all-products/renewable-road-transport/neste-my-renewable-diesel> [Viitattu 30.11.2023].

Palmer B., 2020. Guide to concrete curing time & methods. The Concrete Network. [Verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.concretenetwork.com/curing-concrete/> [Viitattu 22.9.2022].

Parma green. 2023. Consolis Parma. [Verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://parma.fi/vastuullisuus/parma-green/> [Viitattu 8.5.2023].

Postin Rahtipalveluille Suomen suurin biokaasukäyttöinen raskaan liikenteen rekkakalusto – kymmenen uutta biokaasurekkaa käyttöön ympäri Suomen tänä vuonna. 2020. Posti. [Verkkodokumentti]. <https://www.posti.com/media/mediauutiset/2020/postin-rahtipalveluille-suomen-suurin-biokaasukayttoinen-raskaan-liikenteen-rekkakalusto--kymmenen-uutta-biokaasurekkaa-kayttoon-ympari-suomea-tana-vuonna/> [Viitattu 30.11.2023].

Päästöttömät työmaat – kestävien hankintojen green deal-sopimus. 2023. Sitoumus2050. [Verkkodokumentti]. Saatavissa: [https://sitoumus2050.fi/fi\\_FI/paastotontyomaa#/](https://sitoumus2050.fi/fi_FI/paastotontyomaa#/) [Viitattu 23.11.2023].

Rakenteiden kuivattaminen, 2022. Sisäilmayhdistys ry. [Verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.sisailmayhdistys.fi/Terveelliset-tilat/Kunnossapito-ja-korjaaminen/Purku-kuivaus-ja-puhdistus/Rakenteiden-kuivattaminen> [Viitattu 20.9.2022].

Ramirent, 2019. Rakennustyömaiden väliaikainen lämmitys. [Verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.ramirent.fi/blogi/rakennustyomaiden-valiaikainen-lammitys> [Viitattu 31.8.2022].

RTS EPD-ympäristöseloste. 2023. Rakennustietosäätiö. [Verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://cer.rts.fi/epd-ymparistoseloste/> [Viitattu 26.4.2023].

Ryskamp R., 2017. Emissions and Performance of Liquefied Petroleum Gas as a Transportation Fuel: A Review. West Virginia: West Virginia University. [Verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://auto-gas.net/wp-content/uploads/2019/11/2017-WLPGA-Literature-Review.pdf> [Viitattu 1.9.2022].

Suomen Kansallinen Geologian Komitea. Geologia.fi, 2019. Geoenergia. [Verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.geologia.fi/2019/12/31/geoenergia/> [Viitattu 8.9.2022].

Säynäjoki A., Heinonen J. & Junnila S., 2011. Carbon footprint assessment of a residential development project. International journal of environmental science and development, 2 (2), S. 116-123.

Towards cleaner maritime transport with LBG. 2023. Gasum. [Verkkodokumentti]. <https://www.gasum.com/en/sustainable-transport/maritime-transport/liquefied-biogas/> [Viitattu 30.11.2023].

Uusiutuva energia Suomessa, 2022. Työ- ja elinkeinoministeriö. [Verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://tem.fi/uusiutuva-energia> [Viitattu 20.9.2022].

Vihreä betoni. 2023. Rudus. [Verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://www.rudus.fi/tuotteet/betoni/vihrea-betoni> [Viitattu 25.4.2023].

Volter 40 outdoor, 2022. Volter. [Verkkodokumentti]. Saatavissa: <https://volter.fi/products/volter-40-outdoor/> [Viitattu 19.9.2022].

What is carbon neutrality and how can it be achieved in 2050?, 2022. European parliament. [Verkkodokumentti]. Saatavissa:

<https://www.europarl.europa.eu/news/en/headlines/society/20190926STO62270/what-is-carbon-neutrality-and-how-can-it-be-achieved-by-2050> [Viitattu 14.3.2023].

What is the Greenhouse Gas (GHG) Protocol? 2023. PlanA.Earth. [Verkkodokumentti].  
Saatavissa: <https://plana.earth/glossary/greenhouse-gas-ghg-protocol#what-is-the-difference-between-iso-14064-and-ghg-protocol> [Viitattu 23.11.2023].

Ympäristöministeriö, 2019. Rakennuksen vähähiilisuuden arviointimenetelmä.  
Helsinki: Valtioneuvoston hallintoyksikkö, Julkaisutuotanto. ISBN: 978-952-361-029-3

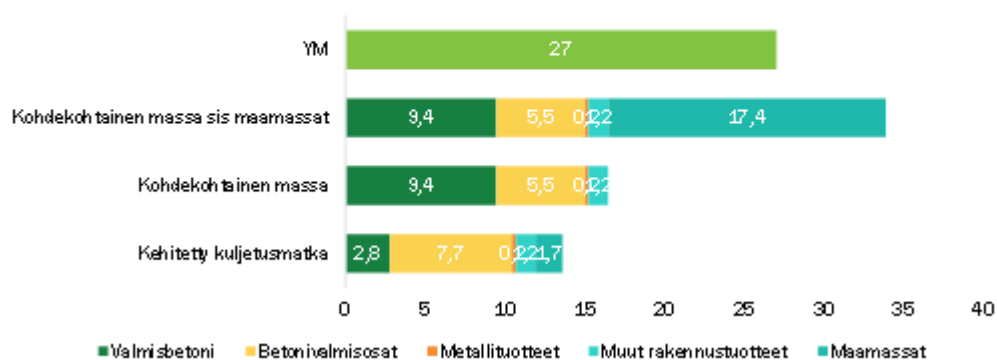
Tulostesivut Raksystems Oy:n käyttöön toteutetuista hiilijalanjäljen arvioinnista.

## A4 Kuljetukset työmaalle

## Esimerkkikohte

	kg	kg/n-m2	Osuus	kgCO2e	Kuljetusmatka km
Rakennustuotteiden kokonaismassa	6 333 100	1 735			
Valmisbetoni	3 192 622	875	50 %	10 126	30
Betonivalmisosat	2 641 310	724	42 %	27 924	
- Betonielementtiseinät	1 878 014	515	30 %	19 854	100
- Ontelolaatat	0	0	0 %	0	100
- Betonimassiivilaatat	730 316	200	12 %	7 721	100
- Muut betonivalmisosat	32 980	9	1 %	349	100
Metallituotteet	80 023	22	1 %	863	102
- Betoniraidoitukset	65 735	18	1 %	709	102
- Muu teräs	14 288	4	0 %	154	102
Muut rakennustuotteet	419 146	115	7 %	4 520	102
Maamassat	5 889 845	1614		6 227	10

	kgCO2e	kgCO2e/n-m2
YM Oletusarvo	98 399	27,0
Kohdekohtainen massa	68 293	18,7
Kohdekohtainen massa sis. Maamassat	131 805	36,1
Kehitetty kuljetusmatka	49 659	13,6



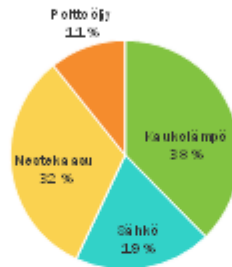
Kuva 16. Esimerkkikohteen työmaakuljetuksissa muodostuva hiilijalanjälki.

## A5 Työmaavaihe

### Esimerkkikohte

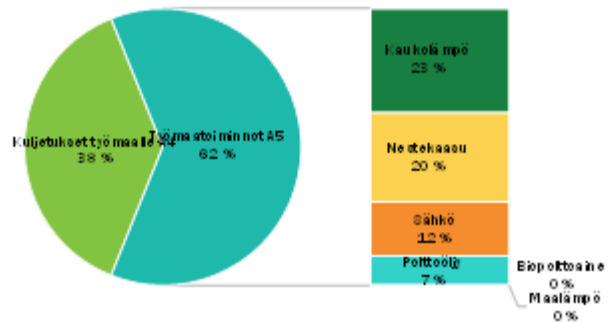
Energiamuoto	Kulutus kWh	Energijakauma	gCO <sub>2</sub> /kWh	kgCO <sub>2</sub> e	kgCO <sub>2</sub> e/n-m <sup>2</sup>	Hiilijalanjäljen jakauma A5
Kaukolämpö	454 593	49,0 %	133,8	60 824	17	37,6 %
Sähkö	246 238	26,5 %	127,4	31 371	9	19,4 %
Nestekaasu	170 472	18,4 %	306,0	52 165	14	32,3 %
Polttoöljy	56 824	6,1 %	306,0	17 388	5	10,8 %
Biopolttoaine	0	0,0 %	0	0	0	0,0 %
Maalämpö	0	0,0 %	0	0	0	0,0 %
<b>Yhteensä</b>	<b>928 127</b>			<b>161 748</b>	<b>44,3</b>	

Hiilijalanjäljen jakauma A5



Rakennusvaihe	kgCO <sub>2</sub> e	kgCO <sub>2</sub> /n-m <sup>2</sup>
A4	98 399	27,0
A5	161 748	44,3
<b>Yhteensä</b>	<b>260 147</b>	<b>71,3</b>

Rakennusvaiheen hiilijalanjälki



Kuva 17. Esimerkkikohteen työmaatoiminnoista muodostuva hiilijalanjälki.