

Opinnäytetyö (AMK)

Energia- ja ympäristötekniikka

2023

Timo Heikkilä

# Asumisen energiaratkaisujen hiilijalanjälkivertailu



Opinnäytetyö (AMK) | Tiivistelmä

Turun ammattikorkeakoulu

Energia- ja ympäristötekniikka

2023 | 97 sivua

Timo Heikkilä

## Asumisen energiaratkaisujen hiilijalanjälkivertailu

Suomalaisten hiilijalanjäljestä merkittävä osa syntyy asumisen energiakäytöstä. Ekologisesti kestävien energiaratkaisujen tuomia kasvihuonekaasupäästövähennyksiä lasketaan usein huomioiden vain käyttövaiheessa säästyvä ostoenergian kulutus ja sen myötä syntyvät päästövähennykset.

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on kerätä olemassa olevaa tutkimukseen perustuvaa tietoa asumisen energijärjestelmien koko elinkaaren kasvihuonekaasupäästöistä ja koostaa näitä tietoja käyttäen Microsoft Excel -pohjainen hiilijalanjälkilaskuri toimeksiantajayritys AFRY Buildings Finland Oy:n käyttöön. Hiilijalanjälkilaskurin tarkoitus on toimia osana laajempaa elinkaarikustannuksiin keskittyvää hankesuunnitelmavaiheen laskentatyökalua.

Tutkimuksessa keskityttiin lämpöpumppu- ja aurinkoenergiaratkaisujen tarkasteluun 50 vuoden tarkasteluajanjakson aikana. Vertailukohtana käytettiin kaukolämpöä ja ostosähköä. Tutkimuksen tulosten perusteella valtaosa energijärjestelmien hiilijalanjäljestä syntyy käyttövaiheen ostoenergian käytöstä. Ostoenergian päästökehityssennusteet huomioiden käyttövaiheen merkitys koko elinkaaren päästöistä tulee kuitenkin laskemaan tulevaisuudessa kasvattaen elinkaaren alun ja lopun merkitystä järjestelmien hiilijalanjälkeä laskettaessa.

Asiasanat:

hiilijalanjälki, LCA, energian tuotanto, ilmaston lämpenemispotentiaali, lämpöpumput, aurinkoenergia, ostoenergia

Bachelor's Thesis | Abstract

Turku University of Applied Sciences

Energy and Environmental Engineering

2023 | 97 pages

Timo Heikkilä

## Comparison of Carbon Footprints in Residential Energy Solutions

A significant portion of the carbon footprint of Finnish consumers is created by residential energy usage. The greenhouse gas emission reductions attained with ecologically sustainable energy solutions are often calculated considering only the reduced consumption of purchased energy and the resulting emission reductions during the use-phase of the system.

The objective of this thesis was to gather existing research data considering the entire life cycle of the residential energy solutions and by using this information compile a Microsoft Excel based carbon footprint calculation tool for the client AFRY Buildings Finland Oy. The carbon footprint calculator is intended to serve as part of a broader life-cycle cost calculator tool for the project planning phase.

The study focused on heat pump and solar energy solutions over a 50-year evaluation period, with district heating and grid electricity as reference systems. According to the results most of the carbon footprint is created by the use-phase consumption of purchased energy. Considering the emission development forecasts, the share of the emissions from the use-phase will decrease in the future and importance of the early and late stages of the life cycle will be emphasized.

Keywords:

Carbon footprint, LCA, global warming potential, heat pumps, solar energy, purchased energy

# Sisältö

<b>Käytetyt lyhenteet</b>	<b>8</b>
<b>1 Johdanto</b>	<b>10</b>
1.1 Kohti kestävämpää yhteiskuntaa	10
1.2 Työkalut hiilijalanjälkityöhön	11
<b>2 Työn taustoitus</b>	<b>13</b>
2.1 Elinkaariarviointi ja hiilijalanjäkilaskenta	13
2.2 Elinkaariviisaat päätökset osana rakentamisen systeemistä murrosta	15
2.3 Energiajärjestelmien hiilijalanjäljen tarkastelu	18
2.4 Kehityskulut sähkön ja kaukolämmön tuotannossa	19
2.5 Herkkyystarkastelu	21
<b>3 Tutkimusmenetelmät</b>	<b>22</b>
3.1 Kirjallisuuskatsaus	22
3.2 Asiantuntijahaastattelu	23
3.3 Hiilijalanjälkivertailu	23
3.3.1 Tavoite	24
3.3.2 Soveltamisala	25
<b>4 Ostoenergia</b>	<b>31</b>
4.1 Kaukolämpö	31
4.1.1 Kaukolämpöjärjestelmän osat ja tekniset käyttöiät	32
4.1.2 Kaukolämmityksen hiilijalanjälki	33
4.2 Ostosähkö	36
<b>5 Energiajärjestelmät</b>	<b>38</b>
5.1 Aurinkosähkö	38
5.1.1 Aurinkosähköjärjestelmän osat ja tekniset käyttöiät	38
5.1.2 Aurinkosähköjärjestelmän hiilijalanjälki	40
5.2 Aurinkolämpöjärjestelmät	42
5.2.1 Aurinkolämpöjärjestelmän osat ja tekniset käyttöiät	44

5.2.2 Aurinkolämpöjärjestelmän hiilijalanjälki	45
5.3 Maalämpö	47
5.3.1 Maalämpöjärjestelmän osat ja tekniset käyttöiät	48
5.3.2 Maalämpöjärjestelmän hiilijalanjälki	49
5.4 Ilmalämpöpumput	54
5.4.1 Ilmalämpöpumppujärjestelmän osat ja tekniset käyttöiät	55
5.4.2 Ilmalämpöpumppujärjestelmän hiilijalanjälki	56
5.5 Poistoilmalämpöpumppu	59
5.5.1 Poistoilmalämpöpumppujärjestelmän osat ja tekniset käyttöiät	60
5.5.2 Poistoilmalämpöjärjestelmän hiilijalanjälki	61
<b>6 Elinkaarivertailu</b>	<b>63</b>
6.1 Vertailulaskuri	63
6.2 Case-esimerkki	65
6.2.1 Kohde	65
6.2.2 Tulokset	66
<b>7 Loppupohdinta</b>	<b>72</b>
7.1 Katsaus tuloksiin	72
7.2 Jatkotutkimus- ja kehityskohteita	74
<b>Lähteet</b>	<b>78</b>

## **Liitteet**

Liite 1. Asiantuntijahaastattelun haastattelukysymykset

Liite 2. Järjestelmäosien päästökertoimet

Liite 3. Asuinkerrostalojen keskiarvoinen energia- ja vedenkulutus Turussa

Liite 4. Vertailun järjestelmien hiilidioksidipäästöt moduuleittain

## Kuviot

Kuvio 1. LCA-prosessin vaiheet kaaviokuvana.	14
Kuvio 2. Esimerkki lämmitysjärjestelmän elinkaaren prosessikulkukaaviosta.	18
Kuvio 3. Rakennuksen elinkaaren vaiheet (Ympäristöministeriö 2021, 12–13).	27
Kuvio 4. Kaukolämmön vastuuraja lämpölaitoksen ja asiakkaan välillä.	32
Kuvio 5. Kaukolämmön päästökertoimen kehitys (CO <sub>2</sub> data 2023b).	34
Kuvio 6. Sähkön tuotannon päästökertoimen kehitys (CO <sub>2</sub> data 2023d).	37
Kuvio 7. Aurinkolämpöjärjestelmän yksinkertaistettu rakenne.	43
Kuvio 8. Maalämpöjärjestelmän yksinkertaistettu rakenne.	48
Kuvio 9. Ilma-vesilämpöpumppujärjestelmän yksinkertaistettu rakenne.	55
Kuvio 10. Poistoilmalämpöpumppujärjestelmän yksinkertaistettu rakenne.	59
Kuvio 11. Lämmitysjärjestelmien hiilijalanjäljet jaoteltuna vaiheittain 50 vuoden tarkasteluajanjaksolla.	67
Kuvio 12. Elinkaarikustannusten ja hiilijalanjäljen vertailu 50 vuoden tarkasteluajanjaksolla.	68
Kuvio 13. Elinkaarikustannusten ja hiilijalanjäljen vertailu 25 vuoden tarkasteluajanjaksolla.	68
Kuvio 14. Maalämmön elinkaaren vaiheiden osuudet hiilijalanjäljestä vuosien 2024–2075 välillä.	69
Kuvio 15. Maalämmön elinkaaren vaiheiden osuudet hiilijalanjäljestä vuosien 2049–2100 välillä.	70
Kuvio 16. Poistoilmalämpöpumpulla tuetun kaukolämmityksen elinkaarikustannukset ja hiilijalanjälki herkkyystarkasteluihin verraten.	71

## Taulukot

Taulukko 1. Kaukolämpöjärjestelmän osat ja niiden tekniset käyttöiät (Rakennustieto Oy 2008, 16–18).	33
Taulukko 2. Aurinkosähköjärjestelmän osien tekniset käyttöikäoletukset.	40
Taulukko 3. Aurinkopaneelituotannon päästökertoimia valmistusmaan mukaan (Fraunhofer ISE 2021).	41
Taulukko 4. Aurinkopaneelijärjestelmien hiilijalanjälkiä eri kokoluokissa (Dodd ym. 2018, 31–34).	42
Taulukko 5. Aurinkolämpöjärjestelmien osien tekniset käyttöikäoletukset.	44
Taulukko 6. Aurinkolämpöjärjestelmän osien hiilijalanjälkitietoja	47
Taulukko 7. Maalämpöjärjestelmän osien tekniset käyttöikäoletukset (Rakennustieto Oy, 2008, 14–15).	49
Taulukko 8. Maalämpöpumppujen SPF-lukuja (Eskola ym. 2012, 11).	50
Taulukko 9. Maalämpöjärjestelmien hiilijalanjälkitietoja (Ökobaudat 2022b–g).	52
Taulukko 10. Gebwell Taurus -lämpöpumppujen elinkaaren hiilijalanjälki (Seppänen & Apilo 2023, 23–24).	52
Taulukko 11. Kompressorin hiilijalanjälki (Danfoss Climate Solutions 2023).	53
Taulukko 12. Ilmalämpöpumppujärjestelmien osien tekniset käyttöikäoletukset (Rakennustieto Oy 2008, 14–15).	56
Taulukko 13. Ilmalämpöpumppujen SPF-lukuja (Eskola ym. 2012, 11).	57
Taulukko 14. Ilma-vesilämpöpumppujen kasvihuonekaasupäästökertoimia (Ökobaudat 2022h–f.)	58
Taulukko 15. Poistoilmalämpöpumppujen osien tekniset käyttöikäoletukset (Rakennustieto Oy 2008, 14–18).	60
Taulukko 16. Poistoilmalämpöpumpun SPF-lukuja (Eskola ym. 2012, 11–12).	61
Taulukko 17. Päästötiedot ilmanvaihtokoneelle lämmöntalteenottoyksiköllä (CO2data 2023h).	62
Taulukko 18. Asuinkerrostalojen keskiarvoinen energia- ja vedenkulutus.	65

## Käytetyt lyhenteet

CO <sub>2e</sub>	Hiilidioksidiekvivalentti. Yhteismitallistettu yksikkö, jolla eri kasvihuonekaasupäästöjen säteilypakotetta voidaan verrata hiilidioksidin säteilypakotteeseen (SFS-EN ISO 14067:2018, 13).
COP	Coefficient of Performance. Hyötysuhde. (Motiva 2017.)
EPD	Environmental Product Declaration. Ympäristöseloste.
GHG	Greenhouse gas. Kasvihuonekaasu.
GWP	Global Warming Potential. Ilmaston lämpenemispotentialiaali. Kasvihuonekaasujen yhteismitallistamisessa käytetty kerroin. (Tilastokeskus n.d.a.)
IVLP / VILP	Ilma-vesilämpöpumppu.
IPCC	International Panel for Climate Change. Hallitustenvälinen ilmastonmuutospaneeli.
kWh	Kilowattitunti. Energian mittayksikkö.
LCA	Life cycle analysis. Elinkaarianalyysi.
LCC	Life cycle costs. Elinkaarikustannuslaskenta.
LKV	Lämmin käyttövesi.
LTO	Lämmöntalteenotto.
PEF	Product Environmental Footprint. Tuotteen ympäristöjalanjälki.
PILP	Poistoilmalämpöpumppu.
SCOP	Seasonal Coefficient of Performance. Vuosihyötysuhde. (Motiva 2017.)



SPF	Seasonal Performance Factor. Keskimääräinen vuotuinen lämpökerroin. (Motiva 2017.)
TDD	Technical Due Diligence. Tekninen kuntokatselmus.
tkm	Tonnikilometri. Mittayksikkö tieliikenteessä. Suorite, jossa tonni tavaraa kuljetetaan maanteitse yhden kilometrin matkan. (Tilastokeskus, n.d.b.)

# 1 Johdanto

## 1.1 Kohti kestävämpää yhteiskuntaa

Ihmiskunta on nopean systeemisen muutoksen edessä, jossa yhteiskuntien on alettava huomioida ekologinen kestävyys kaikessa liikkumisesta ruuantuotantoon ja kuluttamisesta asumisratkaisuihin. Ihmisten toiminnan vaikutuksista maapallon keskilämpötila on noussut vuosista 1850–1900 nykypäivään 1,1 celsiusasteella. IPCC:n tuoreimman raportin mukaan Pariisin sopimuksessa sovittu tavoite hillitä lämpötilan nousu 1,5 asteeseen tai korkeintaan 2,0 asteeseen voidaan saavuttaa vain välittömällä ja voimakkailla päästövähennyksillä. (Ympäristöministeriö 2023). Ilmastomuutoksen johdannaisvaikutteina syntyvät moninaiset ongelmat ruuantuotannon häiriöistä ilmastopakolaisiin ja sään ääri-ilmiöiden tuhoista valtioiden välisiin konflikteihin uhkaavat tulevaisuuden yhteiskuntien toimintaedellytyksiä.

Näiden riskien minimoimiseksi ja tarvittavien päästövähennyksien aikaansaamiseksi laajat rakenteelliset ja nopeat muutokset erityisesti energian tuotannossa ovat välttämättömiä. Fossiilisten polttoaineiden käytön on vähennyttävä ja energiatehokkuuden lisäänyttävä, jotta ilmaston lämpeneminen olisi mahdollista rajoittaa Pariisin ilmastosopimuksen tavoitteisiin. (Ympäristöministeriö 2023.)

Pohjoismaisen ilmaston synnyttämä lämmitystarve, pitkät välimatkat ja korkea länsimainen kulutustaso kasvattavat suomalaisten vuosittaista hiilijalanjälkeä, joka on maailman mittakaavassa korkea. Kulutuksen hiilijalanjälki henkilöä kohden laskettuna on vuodesta 2015 lähtien pysytellyt noin 8 CO<sub>2</sub>-ekvivalenttitonnessa (Siljander ym. 2023, 81). Vuonna 2023 maapallon biokapasiteetti on ylitetty Suomen osalta jo 31. maaliskuuta. Biokapasiteetilla viitataan maapallon kykyyn tuottaa uusiutuvia luonnonvaroja ja käsitellä ihmisen toiminnan aiheuttamia kasvihuonekaasupäästöjä. Tällaisella kulutuksen tasolla tarvittaisiin noin neljä maapalloa, jos koko maailman väestö kuluttaisi samalla tasolla kuin keskivertosuomalainen. (WWF 2023.)

Vaikka suomalaisen asumisen hiilijalanjälki on ollut laskussa jo 20 vuotta, muodostaa se edelleen noin neljäsosan kulutuksen hiilijalanjäljestä (Siljander ym. 2023, 81). Tästä yli 80 prosenttia koostuu asumisen energiakulutuksesta lämmityksen ja sähkön kulutuksen muodossa (Suomen ilmastopaneeli 2020). Kasvihuonekaasupäästöjen vähentämistoimet kannattaa ensisijaisesti kohdistaa sinne, missä niiden toteuttaminen on kustannustehokkainta. Asumisen ollessa liikkumisen jälkeen merkittävin kulutuksen päästölähde Suomessa kannattaa kustannustehokkaita päästövähennyskeinoja etsiä sen parista (Suomen ilmastopaneeli 2020). Elinkaariviisaat päätökset eivät kuitenkaan tapahdu itsestään ja rakentamisessa kaivataan uudenlaista näkökulmaa ja osaamista vähähiilisempien rakentamis- ja asumisratkaisuiden kehittämisessä.

## 1.2 Työkalut hiilijalanjälkityöhön

Jotta rakentamisen päätöksenteossa osataan tehdä aidosti kestäviä ratkaisuja, tulee rakennusten ja energiajärjestelmien vaikutusarviointia ja elinkaarianalyysiä (LCA) tuoda kiinteämmäksi osaksi jo hankesuunnitteluvaihetta. LCA-laskentaan ja rakennushankkeiden elinkaaritarkasteluun on olemassa valikoima erilaisia työkaluja. Usein LCA-laskurit kuitenkin vaativat käyttäjältään syvempää perehtymistä elinkaariarvioinnin periaatteisiin ja käytäntöihin, eivätkä ne palvele yksityiskohtaisuudessaan hankesuunnitelmavaiheen tarpeita. Rakennusten elinkaaritarkastelutyökaluissa saatetaan keskittyä enemmän aiheutuviin kustannuksiin ja energiakulutuksen hiilijalanjälki näyttäytyä vain käyttövaiheen energiantuotannon kasvihuonekaasupäästöjen kautta.

Opinnäytetyön tavoitteena on kerätä tietoa asumisen energiajärjestelmien hiilijalanjäljistä huomioiden pelkän käyttövaiheessa kulutetun energiatuotannon sijasta koko elinkaaren hiilijalanjälki. Kerätyn aineiston pohjalta rakennetaan Microsoft Excel -pohjainen laskuri järjestelmien hiilijalanjälkivertailuun. Laskurin avulla rakennusalan ammattilainen kykenee esittämään asiakkaalle hankesuunnitteluvaiheessa suuntaa antavia päästövertailuja eri järjestelmien välillä. Tämä opinnäytetyö toteutetaan toimeksiantona AFRY Buildings Finland

Oy:lle. Työkalu yhdistetään AFRY Buildings Finland Oy:n energiajärjestelmien elinkaarikustannuslaskuriin, jolloin hiilijalanjälkivertailu on helppo liittää osaksi kustannustarkastelua.

Aihepiirin laajuus huomioiden opinnäytetyön sisällössä keskitytään ensisijaisesti lämmitysenergian tuotantoon. Tarkasteluun otetaan kuitenkin mukaan myös aurinkosähkö, vaikka aurinkosähkön tuotantoa kulutetaan lämmitysjärjestelmien lisäksi myös muuhun sähkön kulutukseen. Modernit kestävät lämmitysratkaisut vaativat toimiakseen sähköä, jolloin sen paikallisen tuotannon tarkastelu osana laskelmia on perusteltua.

Aiheen taustoituksen ja tutkimuksen rajauksen jälkeen työssä käydään läpi vertailun alle otettavat energiajärjestelmät. Järjestelmät esitellään pääpiirteissään ja niistä kerätään kirjallisuuskatsauksen keinoin olemassa olevaa tutkittua tietoa niiden elinkaaren hiilijalanjäljistä. Kerättyjen päästötietojen pohjalta rakennetaan hiilijalanjälkivertailulaskuri, jonka toimintaa esitellään case-esimerkkien kautta. Lopulta kerätyn tiedon ja case-esimerkkien tulosten perusteella analysoidaan työn tuloksia, esitellään parannusehdotuksia ja jatkokehitys- ja tutkimustarpeita.

## 2 Työn taustoitus

### 2.1 Elinkaariarviointi ja hiilijalanjälkilaskenta

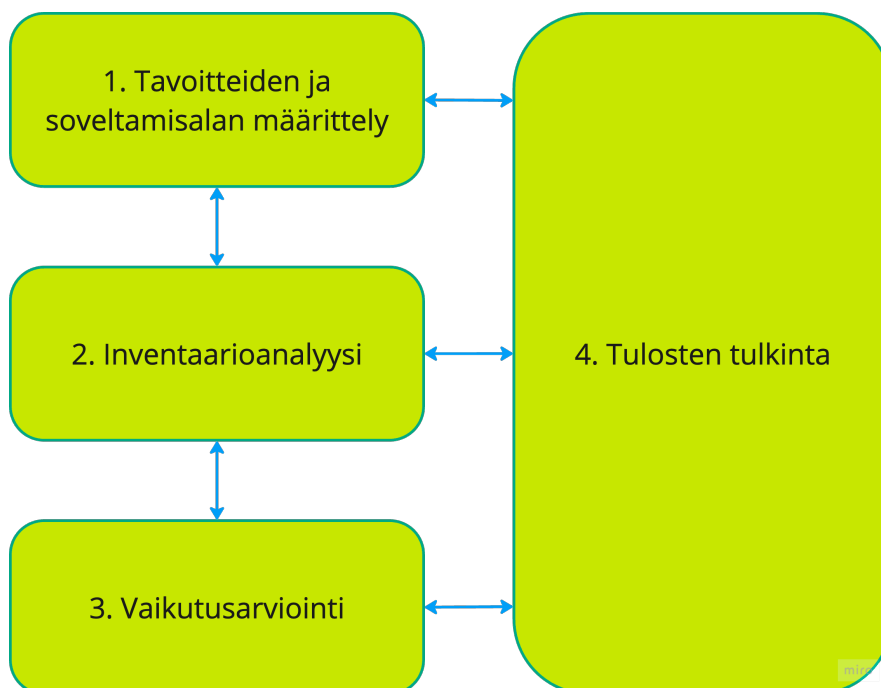
Elinkaariarviointi (LCA) on työkalu, jota voidaan käyttää arvoketjujen tutkimiseen ja niissä syntyvien erilaisten ympäristövaikutusten selvittämiseen. Näitä vaikutuskategorioita ovat esimerkiksi ilmastonmuutos, luonnonvarojen käyttö, maankäyttö, toksisuus, pienhiukkaset, otsonikato ja happamoituminen. Elinkaariarvioinnissa pyritään lähtökohtaisesti huomioimaan koko arvoketju raaka-aineiden hankinnasta niiden prosessointiin, tuotteiden ja palveluiden valmistamiseen, kuljetuksiin, käyttöön sekä tuotteen elinkaaren loppuun ja kierrätykseen. Ympäristövaikutuksiin otetaan mukaan myös elinkaareissa kuluva energia ja vedenkulutus. (SYKE 2022.)

LCA-laskentaa varten on olemassa useita vakiintuneita standardeja, kuten elinkaariarvioinnin yleisiä periaatteita ja vaatimuksia käsittelevät ISO 14040:2006 ja ISO 14044:2006 sekä hiilijalanjäljen laskemista käsittelevä ISO 14067:2018. Elinkaariarviointiin perustuville tyypin III ympäristöselosteille kehitetty ISO 14025:2006 määrittelee niiden laatimisessa käytettävät periaatteet ja menettelyt. Tyypin III ympäristöselosteet kertovat kvantitatiivista tietoa tuotteen elinkaaren aiheuttamasta ympäristökuormituksesta. Esimerkiksi standardiin EN 15804:2012 pohjautuva rakennustuotteiden ympäristöseloste (EPD) on tyypin III ympäristömerkki. (Häkkinen & Kuittinen 2020, 67.) Standardien avulla laskentaa ja sen menetelmiä on yhdenmukaistettu, jolloin eri LCA-laskentojen tulokset ovat vertailukelpoisempia.

Elinkaariarvioinnissa seurataan ISO-standardoidusti neljää eri vaihetta (ISO 14040:2006, 15)

- tavoitteiden ja soveltamisalan määrittely
- inventaarioanalyysi
- vaikutusarviointi
- tulosten tulkinta.

Näiden vaiheiden kautta selvitetään tuotteen tai palvelun vaikutuksia eri vaikutuskategorioihin. Useamman kuin yhden vaikutuskategorian tarkastelulla voidaan välttää ongelmien siirtyminen yhdestä vaikutuskategoriasta toiseen. (SYKE 2022.) Prosessi on luonteeltaan iteratiivinen, jolloin vaiheissa saatetaan tutkimuksen edetessä joutua palaamaan takaisin edeltäviin vaiheisiin (kuvio 1) (SFS EN-ISO 14040:2006, 15–16).



Kuvio 1. LCA-prosessin vaiheet kaaviokuvana.

Hiilijalanjälki on elinkaarianalyysin yksi vaikutuskategorioista, jolla kuvataan mitattavan tuotteen tai palvelun ilmaston lämpenemispotentiaalia, GWP (Global Warming Potential) (Häkkinen & Kuittinen 2020, 48). Hiilijalanjälki ilmaistaan hiilidioksidiekvivalentin (CO<sub>2</sub>e tai CO<sub>2</sub>-ekv) avulla. Hiilidioksidiekvivalentissa on yhteenlaskettuna tarkastellun tuotteen tai palvelun kasvihuonekaasujen määrä huomioiden kunkin kaasun ilmaston lämpenemispotentiaali eli kyky lämmittää ilmastoa. Hiilijalanjälkilaskennan pohjaksi kehitetty ISO 14067:2018 -standardi on laadittu ohjeistukseltaan johdonmukaiseksi standardien ISO 14040 ja ISO 14044 kanssa, jolloin näiden kolmen standardin käytössä rinnakkain ei synny ristiriitaisuuksia. (SFS-EN ISO 14067:2018, 10.)

Uudempana terminä hiilijalanjäljen rinnalle on tullut toiminnan positiivisia vaikutuksia huomioiva hiilikädenjälki. Hiilikädenjäljellä tarkoitetaan tuotteesta, toiminnasta tai palvelusta syntyviä ilmastohyötyjä, joita ei syntyisi ilman niiden toteuttamista. Hiilijalanjäljen tavoin hiilikädenjälki ilmoitetaan hiilidioksidiekvivalenttina. Ympäristöministeriön (2021, 28) mukaan hiilikädenjäljeksi luetaan muun muassa rakennuksessa tuotettu ylimääräinen uusiutuva energia ja materiaalien hyödyntäminen kierrätysraaka-aineena tai energiana. Hiilijalanjälkeä ei vähennetä hiilijalanjäljestä vaan ilmoitetaan erikseen negatiivisina hiilidioksidiekvivalentteina. (Ympäristöministeriö 2021, 28.)

Hiilijalanjäljen eli ilmaston lämpenemispotentiaalin tarkasteluun on ISO-standardien lisäksi kehitetty laajalti käytössä oleva Greenhouse Gas Protocol (GHG), joka tarjoaa yrityksille ja yhteisöille standardoidut kehykset ilmastovaikutusten mittaamiseen. GHG on saanut merkittävän jalansijan maailmanlaajuisesti ja on yleisesti tunnistettu ja käytetty raportointitapa. (GHG Protocol 2023.)

LCA-tutkimukselle on kestävyysmurroksen alla kasvava tarve ja valtavirtaistuminen etenee kansainvälisellä tasolla. Kehittyvien standardien lisäksi esimerkiksi EU:n tuotteiden ympäristöjalanjälkimenetelmällä (PEF) luodaan yhtenäisempi ja yksityiskohtaisempi LCA-ohjeistus. Näin mahdollistetaan keskenään vertailukelpoisempien LCA-tutkimusten tekeminen. (SYKE 2022.)

## 2.2 Elinkaariviisaat päätökset osana rakentamisen systeemistä murrosta

Elinkaari- ja kestävyysajattelu on yhä enemmän osana kansainvälisiä päätöksiä ja tavoitteiden asettamista. Vuoden 2015 Pariisin ilmastopöytäkirja, jossa pitkän aikavälin tavoitteena sovittiin pyrkiä rajoittamaan maapallon keskilämpötilan nousu 1,5 celsiusasteeseen esiteolliseen aikaan verrattuna, ei ole YK:n ainoa pyrkimys kohti kestävämpää tulevaisuutta (Eurooppa-neuvosto 2023a). Agenda 2030 -ohjelmassa on luotu lista kestävyystavoitteista, jotka maiden tulisi

saavuttaa vuoteen 2030 mennessä. Lista sisältää sosioekonomisten ja sosiaalisten kestävyysasteiden lisäksi tavoitteita liittyen ympäristö- ja ilmastovaikutusten minimointiin, kuten puhtaamman energiatuotannon sekä vastuullisemman kuluttamisen ja rakentamisen tavoitteita. (Ulkoministeriö n.d.)

Euroopan unionin vuonna 2019 aloittama vihreän kehityksen ohjelma (Green Deal) on yksi valtioiden rajat ylittävän ilmastopolitiikan edelläkävijöistä. Ohjelman alla on useita merkittäviä aloitteita, kuten eurooppalainen ilmastolaki, joka hyväksyttiin Euroopan unionin parlamentissa vuonna 2021. Lain myötä päästövähennyksille asetetaan kunnianhimoisemmat tavoitteet. Vuoden 2030 päästövähennystavoitetta kiristetään 40 prosentista 55 prosenttiin. Samalla poliittinen tavoite ilmastoneutraaliuteen siirtymisestä vuoteen 2050 mennessä muuttuu sitovaksi velvoitteeksi. (Euroopan parlamentti 2021.) 55-valmiuspaketti (Fit for 55) sisältää joukon ehdotuksia keinoista, joilla sovittuun 55 prosentin päästövähennykseen voidaan päästä. Muun muassa taloudellisten ohjauskeinojen ja ekologisesti kestävämpien polttoaineiden lisäksi paketti sisältää ehdotuksia liittyen uusiutuvaan energiaan ja rakennusten energiatehokkuuteen. (Eurooppa-neuvosto 2023b.)

Uusien sääntöjen pohjalta EU:n rakennuskanta halutaan muuttaa päästöttömäksi vuoteen 2030 mennessä kaikkien uusien rakennusten osalta ja vuoteen 2050 mennessä myös olemassa olevien rakennusten osalta (Eurooppa-neuvosto 2023c). Tavoitteiden saavuttamisen avuksi on luotu Level(s)-menetelmä, joka sisältää puitteet rakennusten vähähiilisuuden ja resurssitehokkuuden arvioimiseen ja raportointiin. Level(s)-menetelmän tarkoitus ei ole syrjäyttää olemassa olevia luokitusjärjestelmiä vaan luoda yhteismitallistettu arviointi- ja raportointitapa näiden pohjalle. Level(s) huomioi kokonaisuudessaan rakennusten elinkaaren ja sen kestävyuden sisältäen työkaluja muun muassa hiilijalanjäljen, kierrätettävyyden, materiaali-tehokkuuden ja kustannustehokkuuden tarkasteluun. (Dodd ym. 2021, 4–5; Häkkinen & Kuittinen 2020, 66.)

Level(s)-menetelmä pohjautuu kestäväen rakentamisen standardiin EN 15978 ja on jaettu kuuteen kestävyystavoitteeseen: elinkaaren hiilijalanjälki,



resurssitehokas materiaalien käyttö, veden kulutus, terveelliset tilat ja sisäilman laatu, sopeutuminen ilmastonmuutokseen ja optimoidut elinkaarikustannukset ja arvo. Kullekin tavoitteelle on määritelty omat mittarit, joiden avulla tavoitteiden saavuttamista voidaan mitata. Esimerkiksi elinkaaren hiilijalanjäljen mittareiksi on määritelty *1.1 Käyttövaiheen energiakulutus* ja *1.2 Elinkaaren hiilijalanjälki*. (Häkkinen & Kuittinen 2020, 66.) Level(s)-menetelmään pohjautuva hiilijalanjälkilaskenta sisällytetään vuoden 2027 alusta alkaen myös osaksi rakennusten energiatehokkuustodistuksia uudistetun rakennusten energiatehokkuusdirektiivin (EPBD) myötä (Euroopan parlamentti 2023).

EU:n velvoitteet tulivat osaksi Suomen lainsäädäntöä uuden ilmastolain myötä, joka tuli voimaan vuonna 2022 (Ilmastolaki 423/2022, 2 §). Myös eduskunnan vuonna 2023 hyväksymän uuden rakentamislain on tarkoitus tuoda ilmastonselvitykset osaksi rakentamista 1.1.2025 alkaen. Asetusehdotus ilmastonselvityksestä on vielä valmistelun alla, mutta sen on tarkoitus tulla voimaan vuoden 2025 alusta alkaen. Rakentamislupa vaadittavaan ilmastonselvitykseen on laadittava koko elinkaaren kattava hiilijalanjäljen ja hiilikädenjäljen arviointi. Arviointi on tehtävä käyttäen ympäristöministeriön laatimaa rakennuksen vähähiilisyden arviointimenetelmää, joka perustuu EU-komission laatimaan Level(s)-menetelmään. (Rakentamislaki 751/2023, § 38; Ympäristöministeriö 2021, 8.)

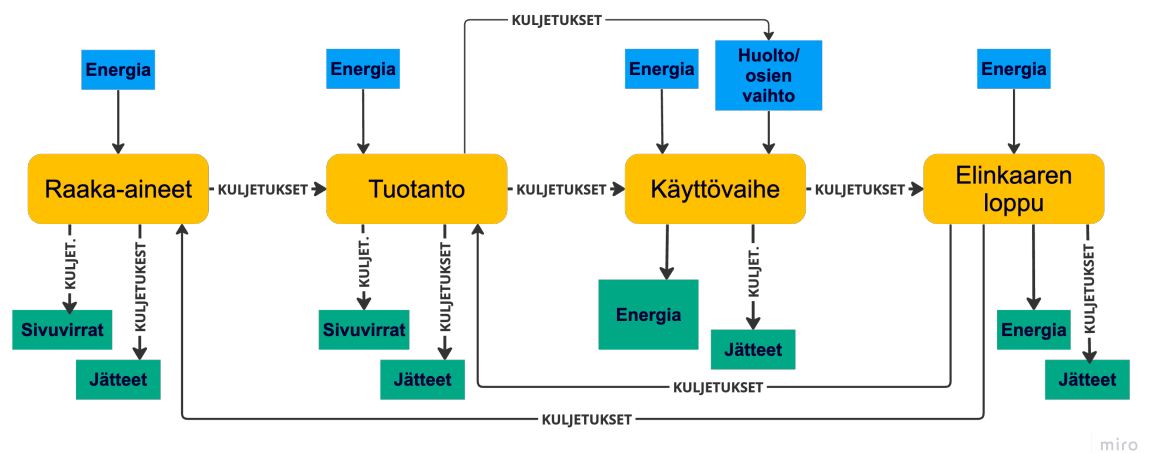
Asetusehdotuksen mukaan ilmastonselvityksen hiilijalanjälki- ja hiilikädenjälkitietojen pitää perustua kansallisen päästötietokannan tietoihin tai muutoin yhtenäistä yleisesti hyväksyttyä arviointimenetelmää käyttäen saatuihin tietoihin. Rakennustuotteiden ja palveluiden geneeristä keskiarvoista päästötietoa keräävä SYKE:n ylläpitämä kansallinen päästötietokanta, CO2data, on toistaiseksi kattavuudeltaan vielä osin kehitystyön alla. Asetusehdotuksen mukaan elinkaaren käyttövaiheen energiakäytön päästöjen arviointi perustuu päästökehitysskenaarioihin nykyhetken energiatuotannon tilastoitujen päästöarvojen sijasta. (HE 139/2022 vp.) Asetuksen lausuntokierroksella työ- ja elinkeinoministeriö näki kuitenkin tärkeäksi, että alueilla, joissa ostoenergian tuotantoa toteutetaan jo kansallisia keskiarvoja

vähäpäästöisemmin, voitaisiin laskentaa toteuttaa todellisia paikallisia päästökertoimia hyödyntäen (Työ- ja elinkeinoministeriö 2022.)

### 2.3 Energiajärjestelmien hiilijalanjäljen tarkastelu

Kun tarkastellaan ja vertaillaan rakennusten energiajärjestelmien hiilijalanjälkiä, huomio kiinnittyy usein niin sanottuihin käyttösidonnaisiin päästöihin (operational GHG emissions) eli niihin kasvihuonekaasupäästöihin, jotka syntyvät rakennuksen käyttövaiheessa kulutetusta sähkön ja lämmön kulutuksesta. Nämä käyttösidonnaiset päästöt voivat syntyä joko ulkoisen toimijan, kuten energialaitoksen, toiminnasta tai ne voivat syntyä kiinteistön suoran toiminnan seurauksena esimerkiksi kiinteistökohtaisen fossiilienergian kulutuksesta. Tuotesidonnaiset päästöt (embodied GHG emissions) eli valmistamisen, ylläpidon ja elinkaaren lopun prosessien kasvihuonekaasupäästöt jäävät usein vähemmälle huomiolle.

Ostoenergian tarpeen ja sen tuotannosta aiheutuvien päästöjen vähentyessä ja energiatehokkuuden parantuessa käyttösidonnaisten päästöjen osuus kokonaispäästöistä pienenee (Häkkinen & Kuittinen 2020, 40). Uusi lainsäädäntö ja vähähiilisyystavoitteet huomioiden energiaratkaisujen hiilijalanjälkeä tarkasteltaessa tulisikin huomioida järjestelmän koko elinkaari raaka-aineiden hankinnan prosesseista elinkaaren loppuun asti (kuvio 2).



Kuvio 2. Esimerkki lämmitysjärjestelmän elinkaaren prosessikulkukaaviosta.

Esimerkkinä aurinkopaneelien käyttövaiheen energiatuotanto itsessään on lähes päästötöntä, mutta koko elinkaarta tarkasteltaessa päästöjä syntyy muun muassa raaka-aineiden hankinnasta, kuljetuksista ja tuotteiden valmistuksessa ja jätehuollossa kuluvasta energiakäytöstä.

## 2.4 Kehityskulut sähkön ja kaukolämmön tuotannossa

Suomalainen energiakenttä on murroksessa ja uusiutuvilla ja päästöttömillä energiatuotantomuodoilla on niin sähkön tuotannon kuin lämmityksenkin toteuttamisessa entistä merkittävämpi rooli. Tämän kehityskulun myötä asumisen hiilijalanjälki on ollut laskussa jo pitkään. (Polo 2023; Siljander ym. 2023, 81.) Suomen ilmastopaneelin (Seppälä ym. 2022, 11) tekemän arvion mukaan asumisen hiilijalanjälki saattaa laskea kolmannekseen vuoden 2015 tasosta vuoteen 2030 mennessä. Ukrainan sodan nostattama energiakriisi on entuudestaan vauhdittanut toimia vihreän siirtymän eteen, ja syyskuussa 2023 niin sanotun päästöttömän energiatuotannon osuus oli ennätyselliset 98 prosenttia (Niemi 2023).

Yhteiskunnan paineet sähköistymiseen kasvihuonekaasupäästöjen hillitsemiseksi lisäävät sähkön kysyntää asumisen lisäksi esimerkiksi liikenteen parissa. Skenaariotarkasteluissa on selvinnyt, että sähkönkulutus voi kasvaa jopa kaksinkertaiseksi nykytasostaan vuoteen 2050 mennessä ja maltillisemminkin kasvuarvioilla tarve saattaa nousta 50 prosenttia nykytasosta. (Lund 2022, 2; Roques et al 2021, 14.) Arvioiden mukaan sähköntuotanto tulee lisääntymään kysynnän mukana etenkin tuuli- ja aurinkovoiman parissa, mikä tulee vaikuttamaan sähkön hintadynamiikkaan laajemman hinnanvaihtelun myötä. Skenaariotarkasteluissa tämän hinnanvaihtelun seurauksena sähkön keskihinta saattaa nousta eräiden arvioiden mukaan jopa 86 prosenttia nykyisestä vuoteen 2050 mennessä, kun jätetään huomioimatta kysyntäpuolen joustovaikutukset. (Roques et al 2021, 20–21.) Schmittin ja Zhoun (2022) tekemässä EU:n energiakatsauksessa vuoteen 2060 kuitenkin arvioitiin, että hinnan volatiliteetin lisääntymisestä huolimatta sähkön keskimääräinen hinta tulee pysyttelemään noin 76 €/MWh

tasolla vuosien 2030 ja 2060 välillä. Vaikka sähköntuotanto siirtyykin kohti uusiutuvia ja vähäpäästöisiä energialähteitä, kannattaa energiatehokkuudeltaan heikon suoran sähkölämmityksen sijaan pyrkiä energiatehokkaampiin lämmitysratkaisuihin.

Kaukolämpö keskitettynä ratkaisuna on tehokas ja taloudellinen lämmöntuotantomuoto etenkin tiheään asutetuilla alueilla. Vuonna 2019 suurimmissa kaupungeissa yli 90 prosenttia asukkaista asui kaukolämmitetyissä rakennuksissa. Koko maassa kaukolämmön markkinaosuus oli 46 prosenttia. Tulevaisuudessa entistä vähähiilisempi kaukolämmön tuotanto muun muassa hukkalämmön, biomassan ja aurinkolämmön avulla saattaa toimia avaintekijänä vähähiilisemmän energiainfrastruktuurin rakentamisessa. (Rämä 2020.) Harvaanasuttuna maana Suomi ei kuitenkaan voi tukeutua yksin kaukolämmön varaan, sillä lämpöhukat kasvavat kestäättömiksi, kun siirtoverkot kasvavat liiallisesti.

Kaukolämmön tuotannon vähähiilisyyden kehittymisellä on vaikutusta myös kaukolämmön hintakehitykseen. Päästökauppapolitiikalla pyritään asteittain luopumaan fossiilisista polttoaineista, joihin turvautuvan lämmöntuotannon hinta tulee tulevaisuudessa nousemaan. Tulevaisuuden joustava ympäristöystävällinen kaukolämmöntuotanto ei koostu mistään yksittäisestä tuotantomuodosta vaan laajemmasta yhdistelmästä eri ratkaisuja. Yhdistelmä erilaisia lämmöntuotantomuotoja yhdistettynä energiatehokkuuden ja kysyntäjouaston lisäämiseen sekä energiavarastointiin mahdollistaa entistä vähähiilisempien kaukolämpöjärjestelmien toteuttamisen. (Rämä 2020.)

Huomionarvioista on myös energiatuotannon investointien kehityssuunta. Lisääntynyt kotimainen sähköntarjonta Olkiluoto 3 -ydinvoimalan tuotannon käynnistyttyä ja tuulivoiman runsaan kasvun myötä on aiheuttanut sähkömarkkinoilla paikoin jopa ylitarjontaa. Sähkön ylitarjonta yhdistettynä kohonneisiin valmistuskustannuksiin ja korkoihin on jarruttanut uusia investointipäätöksiä. (Vihanta 2023.) Energiamurroksen keskellä tuotanto ja kysyntä etsii vielä tasapainoa, millä saattaa olla hidastavia vaikutuksia uusille investoinneille ja puhtaamman energiainfran kehittymiselle. Kehittyvät

sähkönvarastointiteknologiat, kuten suola-akut ja vihreä vety, yhdessä älykkäiden energiajärjestelmien ja sähköverkkojen kanssa luovat perustaa tuotannon ja kysynnän tasapainottamiselle saatavuudeltaan vaihtelevien uusiutuvien tuotantomuotojen maailmassa.

Vähähiilisyyttä pidemmällä ajanjaksolla tarkasteltaessa on hyvä kiinnittää huomiota mahdollisiin muutoksiin laskentaperiaatteissa. Esimerkiksi EU:n uusiutuvien energialähteiden edistämisdirektiivissä ohjeistetaan jättämään biopolttoaineiden poltto ja biomassan korjuu huomiotta hiilijalanjälkilaskennassa tietyin pohjaehdoin (Direktiivi 2018/2001/EU). Biomassan lisäkysyntä energiakäytössä saattaa kuitenkin lisätä paineita maankäytön muutokselle, jossa maatalouskäyttöön otetaan uusia alueita, jotka toistaiseksi toimivat merkittävinä hiilinieluina, kuten metsät ja kosteikot. Laskentaperiaatteisiin saatetaan tulevaisuudessa tehdä muutoksia esimerkiksi tämänkaltaisten ei-toivottujen kehityskulkujen hillitsemiseksi.

## 2.5 Herkkyystarkastelu

Herkkyystarkastelut ovat olennainen osa elinkaariarviointia ja hiilijalanjälkilaskentaa. Koko elinkaarta tarkasteltaessa hyödynnetään spekulatiivisia arvioita ja laskelmia tulevaisuuden kehityskuluista. Nämä arviot pitävät sisällään kuitenkin epävarmuustekijöitä, joita voidaan käsitellä laskennassa herkkyystarkastelun kautta muuttamalla oletusarvoja tai oletettuja kehityskulkuja. Esimerkkejä herkkyystarkastelussa huomioitavista seikoista ovat esimerkiksi energian päästökehitysskenaariot ja käyttövaiheen erilaiset kulutuskäyttäytymiset ja siitä johtuvat muutokset energiakulutuksessa tai tuotteen eliniässä.

### 3 Tutkimusmenetelmät

Opinnäytetyön tiedonhaku toteutettiin kirjallisuuskatsauksena, jonka tukena hyödynnettiin asiantuntijahaastattelua. Kirjallisuuskatsauksen ja asiantuntijahaastattelun avulla kerättyjen tietojen pohjalta rakennettiin hiilijalanjälkivertailulaskuri osaksi opinnäytetyötä.

#### 3.1 Kirjallisuuskatsaus

Kirjallisuuskatsauksessa pyrittiin keräämään tietoa opinnäytetyössä tarkasteltavien järjestelmien elinkaarien kasvihuonekaasupäästöistä ja elinkaariin liittyvistä erityispiirteistä. Päästötietoja kerätessä erityistä huomiota kiinnitettiin tutkimuksissa käytettyihin päästölaskentamenetelmiin ja -rajauksiin sekä käytettyihin standardeihin, jotta kerätty tieto olisi mahdollisimman vertailukelpoista keskenään. Huomiota kiinnitettiin myös tehtyjen tutkimusten ajantasaisuuteen.

Suomen ympäristökeskus SYKE:n ylläpitämää rakentamisen päästötietokantaa pyrittiin hyödyntämään ensisijaisena tietolähteenä päästötietoja kerätessä. Päästötietokannan tavoitteena on vähähiilisemmän rakentamisen edistäminen yhdenmukaistamalla elinkaaren aikaisten ilmastovaikutusten laskentaa, ja se tarjoaa prosessien, palveluiden ja rakennustuotteiden keskimääräisiä päästötietoja (CO<sub>2</sub>data 2023a). Rakentamisen päästötietokannan tukena käytettiin ympäristöministeriön (2019) rakennuksen vähähiilisyden arviointimenetelmän ensimmäisessä versiossa listattuja päästötietoja. Järjestelmäosien päästötietoja kerätessä pyrittiin hyödyntämään myös ympäristöselosteita julkaisevia avoimia EPD-tietokantoja.

Kirjallisuuskatsaus pohjautui osin verkkopohjaisiin lähteisiin, kuten Google Scholar- sekä FINNA -hakupalvelujen kautta löytyneisiin tutkimusraportteihin. Aihepiiriin liittyvää lainsäädäntöä haettiin Finlex-tietopalvelun kautta. Aiheeseen liittyviä standardeja Suomen Standardoimisliiton SFS Online -tietokannasta.

Teknisiä käyttöikäoletuksia haettiin pääsääntöisesti Rakennustieto Oy:n ohjekortista RT-18-10922 *Kiinteistöjen tekniset käyttöiät ja kunnossapitojaksot*.

Kirjallisuutta muun muassa energia-alasta, elinkaarianalyysistä ja rakentamisesta pyrittiin hyödyntämään osana kirjallisuuskatsausta ja pohjatiedonhakua. Nopeasti kehittyvällä alalla kirjallisuuden julkaisujankokhaan ja tiedon ajantasaisuuteen pyrittiin kiinnittämään kuitenkin erityistä huomiota.

### 3.2 Asiantuntijahaastattelu

Tutkimuksen tiedonhaun tukena hyödynnettiin toimeksiantaja AFRY Buildings Finland Oy:n henkilöstöltä löytyvää alan ammattiosaamista. Järjestelmien ja niiden osien tekniseen ikään ja vaihtoväliin liittyvää tietoa ja näkemyksiä kerättiin asiantuntijahaastattelun avulla. Haastateltavana asiantuntijana toimi AFRY Buildings Finland Oy:n johtava asiantuntija (Technical Due Diligence) Olavi Töyli. Haastattelu toteutettiin puhelinhaastatteluna 18.10.2023.

### 3.3 Hiilijalanjätkivertailu

Tässä tutkimuksessa tutkittavaksi ympäristövaikutukseksi rajattiin vaikutus ilmastonmuutokseen, jolloin tutkimuksen sisällössä keskityttiin tarkastelemaan järjestelmien kasvihuonekaasupäästöjä hiilijalanjäljen muodossa. Tässä työssä ei toteutettu suoranaista hiilijalanjätkilaskentaa tai elinkaarianalyysiä itsessään vaan työssä kerättiin kasvihuonekaasupäästötietoja tehdyistä tutkimuksista ja päästötietopankeista. Kerättyä tietoa hyödyntämällä koostettiin työn osana luotu hiilijalanjätkilaskuri, jonka toimintaa esiteltiin hypoteettisen case-esimerkin avulla.

Työn perustana käytettiin ISO 14000 -standardisarjan standardeja SFS-EN ISO 14040:2006 + A1:2020 (Ympäristöasioiden hallinta. Elinkaariarviointi. Periaatteet ja pääpiirteet), SFS-EN ISO 14044:2006 + A1:2018 + A2:2020 (Ympäristöasioiden hallinta. Elinkaariarviointi. Vaatimukset ja suuntaviivoja)

sekä SFS-EN ISO 14067:2018 (Kasvihuonekaasut. Tuotteiden hiilijalanjälki. Hiilijalanjäljen laskemista koskevat ohjeet).

Standardien lisäksi työssä hyödynnettiin ympäristöministeriön laatimaa rakennuksen vähähiilisyuden arviointimenetelmää, joka perustuu Euroopan komission laatimaan Level(s)-menetelmään (Ympäristöministeriö 2021, 8). Level(s)-menetelmän rakennuksen elinkaaren hiilijalanjälkeä koskevan päätavoitteen mittareille *1.1 käyttövaiheen energiakulutus* ja *1.2 elinkaaren hiilijalanjälki* laadittuja ohjeistuksia hyödynnettiin työn tukena. (Dodd ym. 2021, 8–10.)

Päästöillä tässä tutkimuksessa viitataan nimenomaan kasvihuonekaasupäästöihin, jotka ilmaistaan yhteismitallistetusti hiilidioksidiekvivalenttina. Elinkaariarvioinnissa päästöillä tarkoitetaan yleensä laajemmin kaikkia päästöjä mukaan lukien päästöt vesistöihin ja maaperään (SFS-EN ISO 14040:2006, 12).

Vaikka työssä ei tehty suoranaista hiilijalanjälkilaskentaa sen täydessä merkityksessä vaan turvauduttiin sekundaariseen tietoon olemassa olevan tutkimustiedon pohjalta, työn tavoitteiden ja soveltamisalan määrittelyyn käytettiin hiilijalanjälkistandardin (SFS-EN ISO 14067:2018, 23–28) ohjeistuksia.

### 3.3.1 Tavoite

Standardissa ISO 14067 määritellään hiilijalanjälkilaskennan yleistavoitteeksi laskea tuotteen hiilidioksidiekvivalentti ja ilmaista sen avulla tuotteen potentiaaliset vaikutukset ilmaston lämpenemiseen (SFS-EN ISO 14067:2018, 23). Tässä työssä tavoitteena oli selvittää asumisen eri energiajärjestelmiä koskevaa elinkaari- ja hiilijalanjälkilaskennan laadulliset kriteerit täyttävää sekundaarista hiilijalanjälkitietoa, jonka pohjalta voitiin toteuttaa suuntaa antavaa vertailua eri järjestelmien välillä.



Selvitys tehtiin AFRY Buildings Finland Oy:n toimeksiantona. Toimeksiantaja sai selvityksen pohjalta yrityksen käyttöön soveltuvan Microsoft Excel -pohjaisen hiilijalanjälkivertailulaskurin, jota voidaan käyttää yrityksessä suuntaa antavana apuna hankesuunnitelmavaiheessa. Laskurin avulla asiakkaan suuntaan voidaan viestiä eri järjestelmien arvioiduista vaikutuksista ilmastonmuutokseen ja tuoda ilmastovaikutukset osaksi kestäväää päätöksentekoa. Laskurin luomisen tukena käytettiin ympäristöministeriön (2021) rakennuksen vähähiilisyden arviointimenetelmässä määriteltyjä ohjeistuksia, jotta laskurin tulokset olisivat oletettavasti linjassa ilmastaselvitysten laatimisessa käytettävän kansallisen menetelmän kanssa.

### 3.3.2 Soveltamisala

Standardin mukaan soveltamisalan on oltava johdonmukainen tavoitteiden kanssa (SFS-EN ISO 14067:2018, 23). Tässä luvussa määriteltiin standardissa kuvattuja soveltamisalaan liittyviä osa-alueita. Soveltamisalan määrittelyn tukena käytettiin Level(s)-menetelmässä ja ympäristöministeriön (2021, 12) rakennuksen vähähiilisyden arviointimenetelmässä määriteltyjä moduuleihin jaettuja rakennuksen elinkaaren vaiheita.

### **Tutkittavat järjestelmät**

Tavoitteena oli koota elinkaaren hiilijalanjälkitietoa seuraavista lämmitysjärjestelmistä:

- aurinkolämpö
- aurinkosähkö
- maalämpö
- ilmalämpöpumppu / vesi-ilmalämpöpumppu (ILP ja VILP)
- poistoilmalämpöpumppu (PILP)
- kaukolämpö
- suora sähkölämmitys.

Kaikki yllä luetellut lämmitysjärjestelmät eivät sovellu etenkin Suomen olosuhteissa yksinään asuinrakennuksen lämmitysjärjestelmäksi vaan vaativat tuekseen muiden järjestelmien rinnankäyttöä. Tämä huomioitiin järjestelmän hiilijalanjälkeä laskettaessa ja tuloksia analysoitaessa.

### **Toiminnallinen yksikkö**

Toiminnallisen yksikön on oltava selkeästi määriteltävissä ja mitattavissa (SFS-EN ISO 14067:2018, 24). Laskennallisena yksikkönä työssä käytettiin energiankäytön mittauksessa yleisesti käytössä olevaa kilowattituntia, kWh. Laskennan tulokset esitettiin hiilidioksidiekvivalenttien painon mukaan ympäristöministeriön (2021, 35) rakennuksen vähähiilisyuden arviointimenetelmässä esitettyssä muodossa  $\text{kgCO}_2\text{e}/\text{m}^2/\text{a}$ , jossa pinta-alana ( $\text{m}^2$ ) toimii rakennuksen lämmitetty nettopinta-ala ja ajanjaksona keskiarvotettu vuosikulutus 50 vuoden tarkasteluajanjakson ajalta. Rakennuksen lämmitetty nettopinta-ala määritellään standardin SFS 5139 (2011, 18) mukaan lämmitettyjen kerrostasoalojen summana ulkoseinien rakennusosa-ala vähennettyjä.

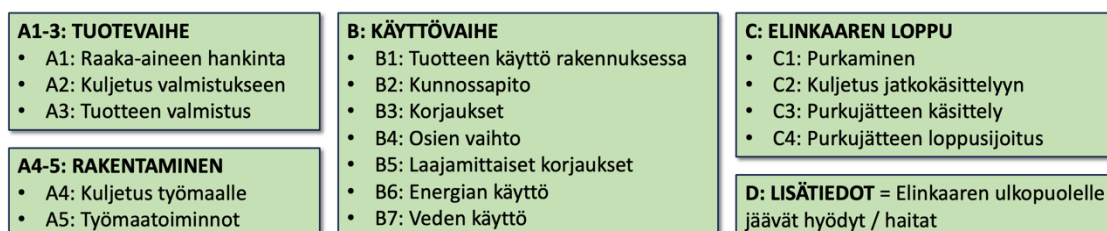
### **Tutkimuksen rajaus**

Selvitys keskittyi energiajärjestelmien kasvihuonekaasupäästöihin hiilidioksidiekvivalentin muodossa. Muita elinkaariarvioinnin vaikutuskategorioita, kuten vedenkäyttöä tai ympäristöpilaantumista, ei huomioitu.

Maantieteellisesti tutkimus rajattiin vertailulaskurin ominaisuuksien osalta Suomen rajojen sisään. Sekundaariseen tietoon perustuvia kasvihuonekaasupäästötietoja kerättyä rajausta jouduttiin kuitenkin laajentamaan olemassa olevan tutkimustiedon mukaisesti myös Suomen rajojen ulkopuolelle. Tarkastelussa pyrittiin huomiomaan eri maissa toteutettujen tutkimusten vertautuminen Suomen oloihin ja infrastruktuuriin.

Analyyssissä sovellettiin 50 vuoden tarkasteluajanjaksoa. Ajanjakso perustuu ympäristöministeriön (2021, 13) laatimaan rakennuksen vähähiilisyiden arviointimenetelmään. Vaikka rakennuksen tavoitteellinen tekninen käyttöikä on tätä huomattavasti pidempi, lyhyempi 50 vuoden tarkasteluajanjakso on perusteltu. Pidempi tarkasteluajanjakso lisää epävarmuustekijöitä käytön aikaisiin osatekijöihin. (Ympäristöministeriö 2021, 13–14; Häkkinen & Kuittinen 2020, 79.)

Hiilijalanjälkiselvitykseen sisällytyt elinkaaren vaiheet määriteltiin ympäristöministeriön (2021, 12–13) rakennuksen vähähiilisyiden arviointimenetelmän mukaisia elinkaaren vaiheita hyödyntäen (kuvio 3). Elinkaaren vaiheista tarkastelun ulkopuolelle jätettiin arviointimenetelmän ohjeiden mukaisesti moduulit B1–B3, B5 sekä B7. Myös moduulit A5 *työmaatoiminnot* ja C1 *purkutyömaan toiminnot* jätettiin työssä huomioimatta niiden vaikean keskimääräisen määriteltävyyden vuoksi. Ympäristöministeriön (2019, 45) arviointimenetelmän ensimmäisessä versiossa sekä rakentamisen päästötietokannassa moduuleille A5 ja C1 esitettyjen keskiarvoisten taulukkoarvojen käyttämistä tässä työssä ei voitu nähdä tarkoituksenmukaisena, sillä kyseiset taulukkoarvot ovat rakennuksen rakennus- ja purkutyömaiden päästöille määritellyjä arvoja rakennuksen pinta-alaa kohden. Energiajärjestelmäremonttien tarkasteluun tämän kaltainen oletusarvo soveltuu heikosti. Elinkaaren kokonaisvaikutukset huomioiden aurinkoenergia- ja lämpöpumppujärjestelmien työmaatoiminnoiksi laskettavien laiteasennusten hiilijalanjäljen voidaan nähdä olevan pieni, jolloin sen rajaaminen ulos tarkastelusta on perusteltavaa.



Kuvio 3. Rakennuksen elinkaaren vaiheet (Ympäristöministeriö 2021, 12–13).

Löydetyn tutkimustiedon perusteella moduuleita C3 ja C4 jouduttiin käsittelemään tietyissä tapauksissa yhtenäisenä kokonaisuutena. Elinkaaren ulkopuolelle jäävinä hyötyinä tarkasteluun sisällytetään hiilikädenjälkivaikutukset moduuleina D1 *Uudelleenkäyttö ja kierrätys*, D2 *hyödyntäminen energiana* ja D3 *tuotettu ylimääräinen uusiutuva energia*. Hiilikädenjälkivaikutusta ei kuitenkaan vähennetä hiilijalanjäljestä ympäristöministeriön ohjeistuksen mukaisesti, vaan se esitellään hiilijalanjälkitietojen rinnalla negatiivisena hiilidioksidiekvivalenttina.

Käyttövaiheessa huomioitavaa järjestelmäosien vaihtoa tarkasteltaessa otettiin huomioon osat, joiden tekninen käyttöikä on tarkasteluajanjaksoa lyhyempi. Teknisellä käyttöiällä tarkoitetaan käyttöönoton jälkeistä aikaa, jolloin tarkasteltavana olevan laitteen tai järjestelmän tekniset toimintavaatimukset täytyvät. Teknisen käyttöiän ylityttyä on tarkoituksenmukaista korvata laite tai järjestelmä uudella. Tekninen käyttöikä on luonteeltaan yleistävä ja perustuu käytössä olevaan kokemukseen ja tietoon. Tietoa on kerätty muun muassa Rakennustieto Oy:n ohjekorttiin RT 18-10922. (Rakennustieto Oy 2008, 2.) Vaihtovälin tarkastelussa käytettiin ympäristöministeriön (2021, 21) arviointimenetelmässä määriteltyä kaavaa.

$$Vaihtoväli = \left[ \left( \frac{\text{rakennuksen arviointijakso vuosina}}{\text{tuotteen suunnittelukäyttöikä vuosina}} \right) - 1 \right]$$

Tarkastelun ulkopuolelle rajataan kiinteistön lämmitysverkosto lämmityspattereineen, putkistoineen ja lattialämmityksineen. Näin tarkastelussa voidaan keskittyä lämmitysjärjestelmien energiatuotannon ja siihen liittyvän lämmönsiirto- ja keruuputkiston tarkasteluun. Käytännössä tarkastelun rajana pidetään kaikkiin järjestelmiin (ilma-ilmalämpöpumppua lukuun ottamatta) sisältyvää lämmönvaraajaa, jonka jälkeiset putkiosat ja muu lämmityslaitteisto rajataan tarkastelun ulkopuolelle.

Rakennuksen vähähiilisyden arviointimenetelmän ja Level(s)-menetelmän taustalla olevan standardi EN 15978 periaatteiden mukaisesti arvioinnin ulkopuolelle voidaan rajata sellaiset tekijät, joiden vaikutus on alle yksi prosentti kokonaisvaikutuksista. Yhteenlaskettuna nämä ulos rajatut tekijät eivät

kuitenkaan saa ylittää viiden prosentin osuutta. Tämä huomioiden tarkastelun ulkopuolelle rajataan esimerkiksi laitteistojen yhteydessä asennettavat sähkökaapelit ja mittarit.

### **Tieto ja sen laatu**

Tutkimuksen tavoitteiden yleisluonteisuuden vuoksi päästötietoina käytettiin sekundaarista tietoa olemassa olevien tutkimustulosten pohjalta. Käytettävää tutkimustietoa haettaessa otettiin huomioon tutkitun järjestelmän maantieteellinen sijainti, tutkimuksen ajankohtaisuus, käytetyt tutkimusmenetelmät, rajaukset, olettamukset sekä muut seikat, joilla voisi olla vaikutusta todetun tutkimustuloksen vertailtavuuden kannalta.

### **Olettamukset ja rajoitukset**

Työssä otettiin huomioon vaihtoehtoisia kehityskulkuja ostoenergian tuotannon kasvihuonekaasupäästöjen kehityksessä herkkyystarkastelun vuoksi. Kansallisen päästötietokannan ostoenergian tuotannon päästökehitysskenaarioita käytettiin lähtökohtaisina perusarvoina tuotannon päästöjen kehitykselle (CO2data 2023b; CO2data 2023d). Herkkyystarkastelun vuoksi päästökehityksen vertailuarvoiksi otettiin ympäristöministeriön (2019, 46) rakentamisen vähähiilisyyden arviointimenetelmän ensimmäisessä versiossa määritellyt ostoenergian päästökehitysskenaariot. Laskurin elinkaarikustannus-tarkastelun herkkyystarkastelussa hyödynnetään luvussa *2.4 Kehityskulut sähkön ja kaukolämmön tuotannossa* käsiteltyjä hintakehitysskenaarioita.

Rakennustieto Oy:n (2008, 2) ohjekortissa annetut tekniset käyttöiät perustuvat käytössä oleviin tietoihin ja kokemuksiin ja ovat luonteeltaan yleistäviä. Teknisiä käyttöikäarvioita käytettäessä on lisäksi huomion arvoista, että ammattilaisten parissa laajassa käytössä oleva kokemukseen ja todettuun tietoon pohjaava Rakennustieto Oy:n ohjekortti RT 18-10922 on nyky muodossaan vuodelta 2008. Tällä hetkellä ohjekortin sisältö on päivitystyön alla, jonka seurauksena

joidenkin tuotteiden tekniset käyttöikäoletukset saattavat muuttua päivitetyn kokemuksen ja tiedon pohjalta. (Töyli, O. haastattelu 18.10.2023.)

Tutkimuksen yleisluontoisuuden vuoksi tarkkoja kuljetusmatkoja ja kuorman täyttöasteita kuljetuksille ei voitu määrittellä. Suunta-antavan laskennan pohjana käytettiin Suomen virallisen tilaston (2017) määrittelemiä keskimääräisiä kuljetusmatkoja. Tilaston mukaan esimerkiksi rakennusmateriaaleille keskimääräinen kuljetusmatka on 102 kilometriä. Jätteiden ja kierrätysmateriaalien kuljetusmatkat ovat keskimääräisesti noin 90 kilometriä. (Suomen virallinen tilasto 2017.) Näitä arvoja käytetään myös rakentamisen kansallisen päästötietokannassa kuljetuksen keskiarvoisen kasvihuonekaasupäästökertoimen määrittelyssä (CO2data 2023a).

Rakennuksen vähähiilisyyden arviointimenetelmän mukaisesti A4-moduulin kuljetusten kuorman täyttöasteeksi menomatkalla oletettiin 80 prosenttia. Paluumatkoina kuorman oletettiin olevan tyhjä. C2-moduulin kuljetuksissa osuudet olivat käänteiset. Noutomatkalla kuorma oletettiin tyhjäksi ja paluumatkalla oletuksena oli 80 prosentin täyttöaste. (Ympäristöministeriö 2019, 23–24.) Laskennallisesti tämä toteutettiin rakentamisen päästötietokannassa 40 prosentin täyttöasteella määriteltyjen päästökertoimien avulla, jolloin samaa päästökerrointa voidaan käyttää kumpaankin suuntaan ajettavan matkan kasvihuonekaasupäästöjen laskemiseen (CO2data 2023a).

## 4 Ostoenergia

Ostoenergialla on tärkeä rooli asumisen energiajärjestelmissä niin sähkön kuin lämmityksenkin osalta. Vaikka kuluttajilla on enenevässä määrin myös omaa paikallista energiantuotantoa esimerkiksi aurinkoenergian ja maalämmön muodossa, ei ostoenergian merkitys ole häviämässä. Esimerkiksi lämpöpumppeihin perustuva maalämpöjärjestelmä vaatii toimiakseen sähköä ja lisälämmityksen tarvetta voidaan paikata niin kaukolämmöllä kuin sähkövastuksillakin. Skenaariotarkastelut ovat tärkeässä osassa ostoenergiantuotannon hiilijalanjälkeä ja sen tulevaisuutta arvioitaessa. Erilaiset päästökehityskulut ja oletukset voivat vaikuttaa huomattavasti tarkasteluajanjaksolla syntyneisiin kasvihuonekaasupäästöihin. Tässä osiossa esitellään kaukolämmön ja ostosähkön tämänhetkisiä keskiarvoisia hiilijalanjälkiä ja niiden ennustettuja kehityskulkuja.

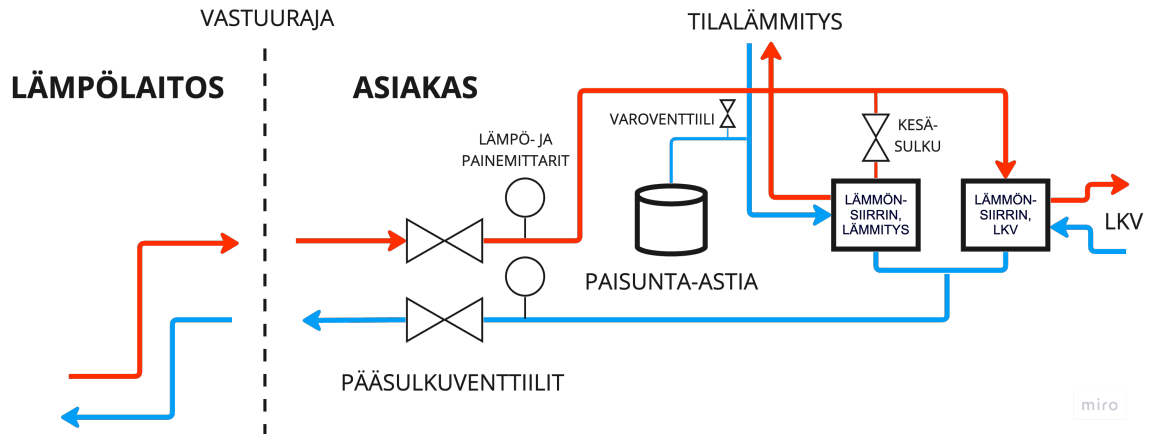
### 4.1 Kaukolämpö

Kaukolämpö on yleisin Suomessa käytetty lämmitysmuoto. Kuten luvussa 2.4. *Kehityskulut sähkön ja kaukolämmön tuotannossa* käsiteltiin, valtaosa etenkin suurten kaupunkien asuinkiinteistöistä on kaukolämmityksen piirissä. (Motiva 2022a; Rämä 2020.) Kaupungistumisen trendin myötä kaukolämmön piirissä on tulevaisuudessa entistä enemmän potentiaalisia asiakkaita erityisesti tiheään asutuilla alueilla, missä kaukolämpö on energiatehokkaimmillaan.

Kaukolämpö on järjestelmä, jossa lämpöä tuotetaan keskitetysti yhteistuotantolaitoksella tai lämpölaitoksella. Tuotettu lämpöenergia voidaan siirtää kaukolämpöputkiston avulla asiakaskiinteistöihin. Kiinteistön lämmönjakohuoneessa kaukolämpöverkoston lämpöenergia voidaan siirtää lämmönjakokeskuksen kautta kiinteistön käyttöön. (Motiva 2022a.)

#### 4.1.1 Kaukolämpöjärjestelmän osat ja tekniset käyttöiät

Kaukolämpöjärjestelmän hiilijalanjälkeä tarkasteltaessa voidaan tarkasteltavat osat rajata niin sanotun vastuurajan avulla (Energiateollisuus 2019, 6). Näin voidaan rajata tarkastelu asiakkaan kaukolämpölaitteisiin, jolloin vertailu muihin lämmitysjärjestelmiin on mielekkäämpää. (Kuvio 4.)



Kuvio 4. Kaukolämmön vastuuraja lämpölaitoksen ja asiakkaan välillä.

Yleisesti asiakkaan kaukolämpölaitteisiin kuuluvat kiinteistöllä sijaitsevat putkistot, venttiilit ja mittarit sekä lämmönjakokeskus lämmönsiirtimiseen ja muine osineen. Taulukossa 1 on listattu Rakennustieto Oy:n (2008, 16–18) määrittelemät tekniset käyttöikäoletukset kaukolämpöjärjestelmän osille. Putkiosien tekninen käyttöikä ylittää lähes poikkeuksetta tarkasteluajanjaksoksi valitun 50 vuotta. Lämmönjakokeskus itsessään lämmönsiirtimiseen, pumppuineen, paisunta-astioineen ja venttiileineen on kuitenkin hyvä vaihtaa 20–25 vuoden kuluttua tehokkaan ja luotettavan toiminnan takaamiseksi (Motiva 2023a).



Taulukko 1. Kaukolämpöjärjestelmän osat ja niiden tekniset käyttöiät (Rakennustieto Oy 2008, 16–18).

Kaukolämpöjärjestelmän osat	Keskimääräinen tekninen käyttöikä, normaali rasitusluokka
Lämmönsiirtimet	20 vuotta
Teräsputket	50... rakennuksen/järjestelmän ikä
Kupariputket	50... vuotta (pl. betonissa paljaana 40... vuotta)
Muoviputket	50 vuotta
Komposiittiputket	50 vuotta
Pumput	20...25 vuotta
Venttiilit	20...25 vuotta
- sulkuventtiilit	30 vuotta
- linjasäätöventtiilit	30 vuotta
- patteriventtiilit	15...20 vuotta
- paisunta-/varoventtiilit	20...25 vuotta

Näihin tietoihin pohjaten tässä työssä kaukolämpöjärjestelmän uusimistarvetta ei tarkastella yksittäisten venttiilien, pumppujen ja muiden osien kautta vaan työssä huomioidaan kaukolämmönjakokeskuksen uusiminen kokonaisuutena. Yksittäisten pienempien järjestelmäosien uusimistarve ei ole kokonaiskuvan kannalta erityisen merkittävää ja näiden merkitys voidaan nähdä peittyvän 50 vuoden tarkasteluajanjaksoon sisältyvien epävarmuustekijöiden alle.

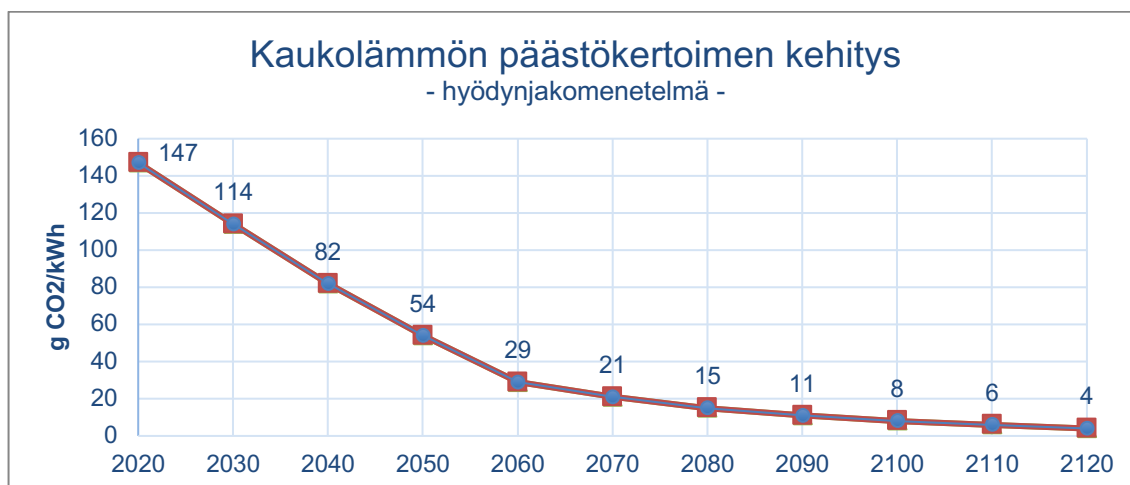
#### 4.1.2 Kaukolämmityksen hiilijalanjälki

Kaukolämpöjärjestelmän hiilijalanjälki riippuu lämmön tuotantotavasta. Lämpölaitosten ja yhteistuotantolaitosten tuottama energia voidaan tuottaa esimerkiksi fossiilisilla polttoaineilla, kuten kivihiilellä tai maakaasulla, mutta enenevässä määrin myös kestävämmillä ratkaisuilla, kuten biopolttoaineilla ja hukkalämmöllä. Vuonna 2019 lähes puolet toimitetusta kaukolämmöstä tuotettiin uusiutuvalla energialla ja hukkalämmöllä. (Motiva 2022a.)

Tilastokeskuksen julkaisemien kaukolämmöntuotannon päästökertoimien perusteella vuosien 2019–2021 keskiarvoksi muodostui 158 kg CO<sub>2</sub>e/MWh, kun yhteistuotanto oli jaettu energiamenetelmällä (Motiva 2023b). Kaukolämmön

erillistuotannolle on määritelty ryhmitellyt paikkakuntaakohtaiset CO<sub>2</sub>-päästökertoimet. Paikkakuntien välillä keskimääräiset päästökertoimet ryhmittäin vaihtelevat 5–450 kg CO<sub>2</sub>e/MWh välillä. (Motiva 2023c.)

CO<sub>2</sub>datan (2023b) rakentamisen päästötietokantaan on koostettu arvio kaukolämmön keskiarvoisen päästökertoimen kehityksestä. Arvio perustuu VTT Oy:n ja SYKE:n (PITKO)-hankkeen kehitysskenaarioihin. Arvion taustalla olevassa laskennassa on otettu huomioon fossiilisten polttoaineiden ja turpeen poltossa syntyvät sekä voimalaitosten rakentamisesta aiheutuvat CO<sub>2</sub>-, CH<sub>4</sub>- ja N<sub>2</sub>O-päästöt. EU:n uusiutuvien energialähteiden edistämisdirektiivin mukaisesti biomassan korjuun päästöjä ei ole huomioitu ja sen poltosta aiheutuvat hiilidioksidipäästöt on laskettu nollana. (Soimakallio 2020.) Tämän työn hiilijalanjälkivertailussa käytetään energijajakomenetelmän sijaan hyödynjakomenetelmällä koostettua energiaskenaariota sen ollessa rakentamisluvan hakemisen pohjana (kuvio 5). 50 vuoden tarkasteluajanjakson lopussa 2070-luvulla kaukolämmön päästökerroin on laskenut noin 14 prosenttiin nykytasosta.



Kuvio 5. Kaukolämmön päästökertoimen kehitys (CO<sub>2</sub>data 2023b).

CO<sub>2</sub>data (2023b) mukaan yksittäisten vuosien päästöarviot voidaan laskea lineaarisesti annettujen arvojen avulla seuraavan kaavan mukaisesti

$$X_i = X_a + \frac{X_b - X_a}{10} * (a_i - a_a)$$

jossa

$X_i$  = halutun vuoden päästökerroin

$X_a$  = alemman tasavuosikymmenen päästökerroin

$X_b$  = ylemmän tasavuosikymmenen päästökerroin

$a_i$  = haluttu vuosiluku

$a_i$  = alempi tasavuosikymmen

Ympäristöministeriön (2019, 46) rakennuksen vähähiilisyiden arviointimenetelmän ensimmäisessä versiossa esitellyt päästökehitysskenaariot kaukolämmön osalta liitetään osaksi tämän työn hiilijalanjälkilaskuria. Vanhemmassa ohjeistuksessa käytettyjen nykyistä optimistisempien päästökehitysskenaarioiden pohjalta voidaan toteuttaa elinkaarilaskennassa tärkeää herkkyystarkastelua.

Lämmönjakokeskuksen uusimisesta syntyvää hiilijalanjälkeä tarkasteltaessa käytetään rakennuksen vähähiilisyiden arviointimenetelmän ensimmäisessä versiossa esitellyjä arvoja. Lämmitysjärjestelmän lämmönjakokeskukselle on arviointimenetelmässä määritelty 0,53 kg CO<sub>2</sub>e/m<sup>2</sup> päästökerroin. Pinta-alana käytetään rakennuksen huonealaa. (Ympäristöministeriö 2019, 46.) Kuljetusten hiilijalanjäljen laskemiseksi käytetään HögforsGST:n (n.d.) lämmönjakokeskusten teknistä esitettä, jossa on listattu yrityksen 20 kW–900 kW tehoisten lämmönjakokeskusten painot. Laskurissa lämmönjakokeskuksen paino huomioidaan sen tehon perusteella automatisoidusti laskuriin syötetyn tehotarpeen mukaisesti. Järjestelmän painon mukaan lasketaan myös ympäristöministeriön tiedoista puuttuvat elinkaaren lopun päästötiedot käyttäen kansallisen päästötietokannan loppukäsittelypäästötietoja metalli- ja muovijätteelle.

## 4.2 Ostosähkö

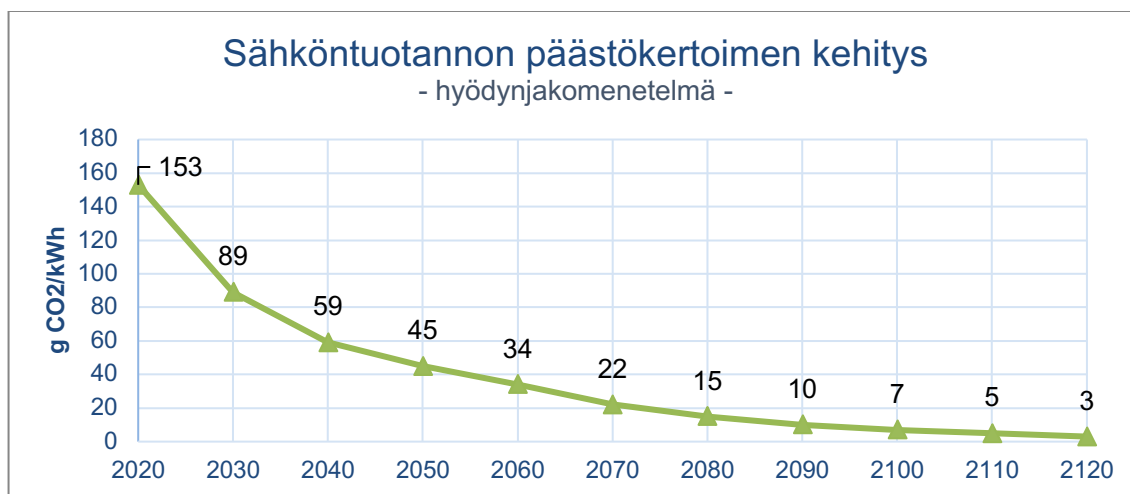
Ostosähköllä on merkittävä rooli moderneissa ympäristöystävällisissä lämmitysjärjestelmissä. Suomen olosuhteissa paikallistuotettu uusiutuva sähköenergia esimerkiksi aurinkopaneeleiden avulla harvemmin riittää ympärivuotisesti kiinteistön sähköenergian tarpeisiin.

Tilastokeskuksen julkaisemien tietojen perusteella vuosien 2019–2021 keskiarvo sähköntuotannon kasvihuonekaasupäästöille Suomessa oli 77 kg CO<sub>2</sub>e/MWh, kun yhteistuotannon osuus oli jaettu energiamenetelmällä. Päästöissä oli huomioitu vain Suomessa tuotettu sähkö eli ulkomaisen tuontisähkön osuutta ei laskelmissa ollut mukana. (Motiva 2023b.)

Energiasäästötoimia arvioitaessa keskimääräisen sähkön tuotannon CO<sub>2</sub>-päästöjen sijaan on myös mahdollista käyttää marginaaliperusteista päästökerrointa, joka perustuu kalleimman sähköntuotannon hiilijalanjälkeen. Kysynnän laskiessa tuotantoa pyritään säätämään kalleinta tuotantoa vähentäen, jolloin hiilijalanjäljestä vähenee ensisijaisesti kalleimman sähköntuotannon päästöt. Marginaaliperusteisena GHG-päästökertoimena voidaan käyttää 600 kg CO<sub>2</sub>/MWh. Marginaaliperustaisen päästökertoimen käyttö ei kuitenkaan ole tässä työssä toteutettavan hiilijalanjälkivertailun näkökulmasta käytännöllistä, sillä se soveltuu huonosti yksittäisen hankkeiden arviointiin. Marginaaliperusteista päästökerrointa käytetäänkin lähinnä Suomen valtion kansainvälisissä raportoinneissa. (Motiva 2023b.)

CO<sub>2</sub>datan (2023d) rakentamisen päästötietokantaan on koostettu arvio sähköntuotannon keskiarvoisen päästökertoimen kehityksestä. Arvio perustuu samoihin VTT Oy:n ja SYKE:n (PITKO)-hankkeen kehitysskenaarioihin, joita käsiteltiin luvussa 4.1.2 *Kaukolämmityksen hiilijalanjälki*. Tämän työn hiilijalanjälkivertailussa käytetään energiajakomenetelmän sijaan hyödynjakomenetelmällä koostettua energiaskenaariota sen ollessa rakentamisluvan hakemisen pohjana (kuviokuva 6). 50 vuoden tarkasteluajanjakson lopussa 2070-luvulla sähköntuotannon päästökerroin on laskenut noin 14 prosenttiin nykytasosta. Yksittäisten vuosien päästöarviot voidaan laskea

lineaarisesti annetuista arvoista luvussa 4.1.2 *Kaukolämmityksen hiilijalanjälki* esitellyn kaavan mukaisesti (CO2data 2023d).



Kuvio 6. Sähkön tuotannon päästökertoimen kehitys (CO2data 2023d).

Ympäristöministeriön (2019, 46) rakennuksen vähähiilisuuden arviointimenetelmän ensimmäisessä versiossa esitellyt päästökehitysskenaariot ostosähkön osalta liitetään osaksi tämän työn hiilijalanjälkilaskuria. Vanhemmassa ohjeistuksessa käytettyjen nykyistä optimistisempien päästökehitysskenaarioiden pohjalta voidaan toteuttaa elinkaarilaskennassa tärkeää herkkyystarkastelua.

Huomiota voidaan kiinnittää hankekohtaisia päästöjä arvioitaessa myös sähköyhtiöiden myymiin uusiutuvan sähkön sopimuksiin, joita markkinoidaan esimerkiksi ekosähkönä tai vihreänä sähkönä. Nämä sopimukset velvoittavat sähköyhtiötä tuottamaan tai ostamaan asiakkaan käyttämän määrän sopimuksessa määriteltujen uusiutuvien tuotantomuotojen sähköä. On kuitenkin huomioitava, että eri tuotantomenetelmin tuotettu sähkö syötetään samaan sähköverkkoon. (Salmela 2004, 9.) Asiakkaan käyttämän sähkön hiilijalanjälki voidaankin nähdä olevan koko sähköntuotannon keskiarvo huolimatta siitä, onko asiakkaalla olemassa niin sanottu vihreä sähkösopimus. Vihreillä sähkösopimuksilla asiakas tukee osaltaan vihreää siirtymää, vaikka kulutetun sähkön hiilijalanjälkeen itsessään sopimuksella ei ole suoraa vaikutusta.

## 5 Energiajärjestelmät

Tässä osiossa esitellään tutkimuksessa käsiteltävät energiajärjestelmät ja niihin liittyvät osat pääpiirteissään. Järjestelmien oleellisimmille osille esitellään niille määritellyt tekniset käyttöikäoletukset, jotta saadaan selville niiden vaihtovälit ja sen mukaisesti tarkasteluajanjakson sisällä tarvittavat osien uusimiset. Osiossa esitellään myös järjestelmille ja niiden osille olemassa olevaa tutkittua hiilijalanjälkitietoa ja niiden päästökertoimia.

### 5.1 Aurinkosähkö

Vuosien 2009 ja 2022 välillä piikkennoisten aurinkomoduulien hinnat laskivat 88–94 prosenttia. Vuosia jatkunut laskusuuntainen hintakehitys on katkennut vain vuosien 2020 ja 2021 välillä, jolloin hinnat nousivat 4–6 prosenttia. (IRENA 2023, 91.) Hintojen laskun myötä paneeleista on tullut entistä houkuttelevampi osa rakennusten hybridienergiajärjestelmiä.

Aurinkosähkön tuotanto perustuu aurinkokennoista muodostuviin aurinkopaneeleihin. Valtaosa markkinoilla olevista kennoista valmistetaan piistä, kun taas uudempien vaihtoehtoisten kennotyyppien, kuten kadmium-telluuri-kennojen (CdTe) ja kuparia, indiumia, galliumia ja seleeniä sisältävien CIGS-kennojen suosio on vähäisempi (Perälä 2017, 43).

Aurinkopaneelien tuottama sähkö on tasavirtaa. Tuotettu sähkö muutetaan tasavirrasta vaihtovirtaan vaihtosuuntaajilla eli inverttereillä, jonka jälkeen sähköä voidaan käyttää osana talon perinteistä sähköjärjestelmää ja mahdollisuuksien mukaan myydä ylijäämäsähkön osalta verkkoon. (Perälä 2017, 75.)

#### 5.1.1 Aurinkosähköjärjestelmän osat ja tekniset käyttöiät

Aurinkosähköjärjestelmän oleellimmat osat ovat aurinkopaneelit, vaihtosuuntaaja eli invertteri, sähkökaapelit sekä tuki- ja kiinnikemekanismit.

Järjestelmään voidaan sisällyttää myös akkujärjestelmiä, jolloin tuotannon vaihtelun vaikutuksia voidaan tasata ja tuotettavaa sähköä varastoida käytettäväksi esimerkiksi yöaikaan. Nämä akkujärjestelmät kuitenkin jätetään tässä työssä tarkastelun ulkopuolelle. Akkujärjestelmiin liittyvät lukuisat muuttujat, kuten käytetyt materiaalit, akkukapasiteetti ja syklikestävyys, tekevät niiden sisällyttämisen tähän työhön suhteettoman työlääksi ja epäkäytännölliseksi.

Aurinkopaneelin tekniseen käyttöikään vaikuttaa merkittävästi se, minkä tyyppinen paneeli on kyseessä. Esimerkiksi yksi- ja monikiteiset piikennopaneelit eivät menetä toimintakykyään käytännössä koskaan, vaikka niiden tuotantokyky laskeekin ajan myötä. Tyypillisesti tuotannon lasku on noin 0,5 prosenttia vuodessa. Amorfiset ohutkalvopaneelit toisaalta menettävät jo lähtökohtaisesti heikommasta tuotantokyvystään jopa 10–15 prosenttia vuodessa. Tällöin amorfisten paneelien järkevä käyttöikä jää 4–6 vuoteen, kun taas yksi- ja monikiteisille paneeleille valmistajat usein lupaavat jopa 25 vuoden tuoton ilman, että tuotto laskee alle 80 prosenttiin uuden paneelin tuotosta. Usein näitä paneeleita on järkevä käyttää vielä tätäkin pidempään. (Perälä 2017, 47.) Rakennustieto Oy:n (2019, 19) ohjekortin mukaan aurinkopaneelien tekninen käyttöikä yleisesti voidaan olettaa olevan 30 vuotta.

Rakennustieto Oy:n (2019, 19) ohjekortin mukaan pienempien aurinkosähköjärjestelmien inverttereiden keskimääräinen tekninen käyttöikäoletus vähintään 15 vuotta, jonka jälkeen laite tulee tarkistaa ja arvioida sen uusimistarve (taulukko 2). Tämä huomioiden invertterit tulisi yleensä uusida tarkasteluajanjakson sisällä vähintään kahdesti. Aurinkosähköjärjestelmä on hyvä tarkastuttaa vuosittain ammattilaisella, jotta mahdollisiin vikoihin voidaan puuttua ja mahdollinen tehon menetys välttää (Rakennustieto Oy 2019, 15).

Taulukko 2. Aurinkosähköjärjestelmän osien tekniset käyttöikäoletukset.

Järjestelmän osat	Keskimääräinen tekninen käyttöikä, normaali rasisluokka
Paneelit: yleisesti	30 vuotta (Rakennustieto Oy 2019, 15)
Paneelit: yksi- ja monikiteiset piipohjaiset paneelit	25... vuotta (Perälä 2017, 47)
Paneelit: amorfiset paneelit	4... 6 vuotta (Perälä 2017, 47)
Verkkoinvertterit: pieni järjestelmä	15... vuotta (Rakennustieto Oy 2019, 15)
Verkkoinvertterit: suuri järjestelmä	yleisesti varaosien saatavuus taattu 25 vuodeksi (Rakennustieto Oy 2019, 15)
Telineet, tuki- ja kiinnikeosat	Järjestelmän ikä

### 5.1.2 Aurinkosähköjärjestelmän hiilijalanjälki

Aurinkosähköjärjestelmän sähköntuotanto itsessään ei suoranaisesti tuota kasvihuonekaasupäästöjä. Tällöin järjestelmän hiilijalanjälki käytännössä rajoittuu järjestelmäosien ja niiden raaka-aineiden tuotantoon, kuljetuksiin, asennukseen, purkuun ja loppukäsittelyyn ja/tai kierrätykseen.

Hybridijärjestelmän osana aurinkosähköjärjestelmällä voidaan muuttaa esimerkiksi lämmitysenergian tuotantoon käytettävän lämpöpumpun energiatuotanto lähes päästöttömäksi niiden ajanjaksojen osalta, kun aurinkopaneelit tuottavat tarpeeksi sähköä järjestelmän käytettäväksi.

CO<sub>2</sub>datan (2023e) rakentamisen päästötietokantaan on määritelty ilmastoselvityksessä käytettävä konservatiivinen arvo aurinkopaneelien tuotevaiheiden (A1–A3) GHG-päästöille, joka on taustatutkimuksen mukaan 10,79 kg CO<sub>2</sub>e/kg. Muunnoskertoimena (kg/paneeli) tietokannassa on annettu 19,5, jolloin yhden aurinkopaneelin tuotevaiheen GHG-päästöt ovat konservatiivisen arvion mukaan keskimäärin noin 210,4 kg CO<sub>2</sub>e. Purkujätteen käsittelyvaiheelle (C3) päästötietokannassa on määritelty 0,5 kg CO<sub>2</sub>e/kg päästökerroin, jolloin yhdelle aurinkopaneelille muodostuu purkujätteen käsittelyvaiheessa keskimäärin 9,75 kg CO<sub>2</sub>e päästöt. (CO<sub>2</sub>data 2023e.)



Ympäristöministeriön (2019) rakennuksen vähähiilisyyden arviointimenetelmän ensimmäisessä versiossa kiteisten aurinkopaneelien päästökertoimeksi on määritelty 242 kg CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup> ja verkkoinverttereiden päästökertoimeksi 22 kg CO<sub>2</sub>e/kpl. Edellä esitellyt päästökertoimet ovat kuitenkin hyvin suuntaa-antavia keskiarvoja, sillä todellisuudessa valmistuksen päästökertoimet vaihtelevat runsaasti esimerkiksi valmistuksessa ja raaka-aineiden hankinnassa käytetyn energian mukaan.

Esimerkiksi Fraunhofer ISE:n (2021) toteuttaman tutkimuksen perusteella Kiinassa tuotetun yksikiteisen piikennopaneelin hiilijalanjälki cradle-to-gate-rajauksella oli 750–810 kg CO<sub>2</sub>e/kWp, kun EU:n alueella tuotetulle vastaavalle paneelille luku on 420–480 kg CO<sub>2</sub>e/kWp (taulukko 3). Saman suuntaisiin lukuihin päästiin Salo Tech Oy:lle yksikiteisestä piikennopaneelisti cradle-to-gate-rajauksella tehdyssä tutkimuksessa, jonka perusteella paneelituotannon hiilijalanjälki on 461,8 kg CO<sub>2</sub>e/kWp (Hakala 2021, 31). Suurin vaikuttava tekijä hiilijalanjälkien eroon Fraunhofer ISE:n (2021) tutkimuksen mukaan on alueiden erilainen energiatuotanto, kun taas esimerkiksi kuljetusten vaikutus on suhteellisen vähäinen. Kuljetukset Kiinasta Eurooppaan kattavat vain noin 3 prosenttia paneelien hiilijalanjäljestä. Eri rakenteilla valmistettujen paneelien hiilijalanjälkierot syntyvät glass-glass-tyyppisen moduulin rakenteesta, jossa ei tarvita alumiinirunkoa paneelin ympärillä. (Fraunhofer ISE 2021.)

Taulukko 3. Aurinkopaneelituotannon päästökertoimia valmistusmaan mukaan (Fraunhofer ISE 2021).

Valmistusmaa	Päästökerroin glass-foil, kg CO <sub>2</sub> e/kWp	Päästökerroin glass-glass, kg CO <sub>2</sub> e/kWp
Euroopan unioni	480	420
Saksa	580	520
Kiina	810	750

Fraunhofer ISE:n (2021) tutkimukseen viitaten aurinkosähköjärjestelmän hiilijalanjälkeä pohdittaessa yhdeksi merkittävimmistä tekijöistä on paneelien valmistusmaa, mutta ei niinkään kuljetusmatkojen vaan energiatuotannon

hiilijalanjäljen vuoksi. Valmistajan ja paneelityypin huolellisella valinnalla voi lähes puolittaa tuotannossa syntyneet päästöt.

EU:n yhteisen tutkimuskeskuksen (JRC) vuonna 2018 julkaistussa tutkimuksessa tutkittiin eri mittaluokan aurinkosähkösystemien 30 vuoden elinkaari vaikutuksia cradle-to-grave-rajauksella huomioiden myös kierrätyksen vaikutus. Tutkittujen järjestelmien koot olivat 3 kW (residential), 24,4 kW (commercial) ja 1,875 MW (utility). Järjestelmät sijaitsivat Strasbourgissa, Ranskassa. Invertterien vaihtovälinä tutkimuksessa käytettiin 10 vuotta, jolloin tarkastelujakson aikana invertterit vaihdettiin kahdesti. (Dodd ym. 2018, 8–10.)

Tämän tutkimuksen perusteella tuotettua energiayksikköä (kWh) kohden aiheutuneet GHG-päästöt laskevat järjestelmän kokoluokan kasvaessa (taulukko 4). Tutkimuksen perusteella ero ei kuitenkaan ole merkittävä etenkin, kun hiilijalanjälkien erot suhteutetaan järjestelmien teholuokkien suuriin eroihin. Asuinkiinteistökokoluokan järjestelmien tehot eroavat toisistaan huomattavasti vähemmän, jolloin järjestelmän koon vaikutus hiilijalanjälkeen tuotettua energiayksikköä kohden voidaan katsoa olevan minimaalinen.

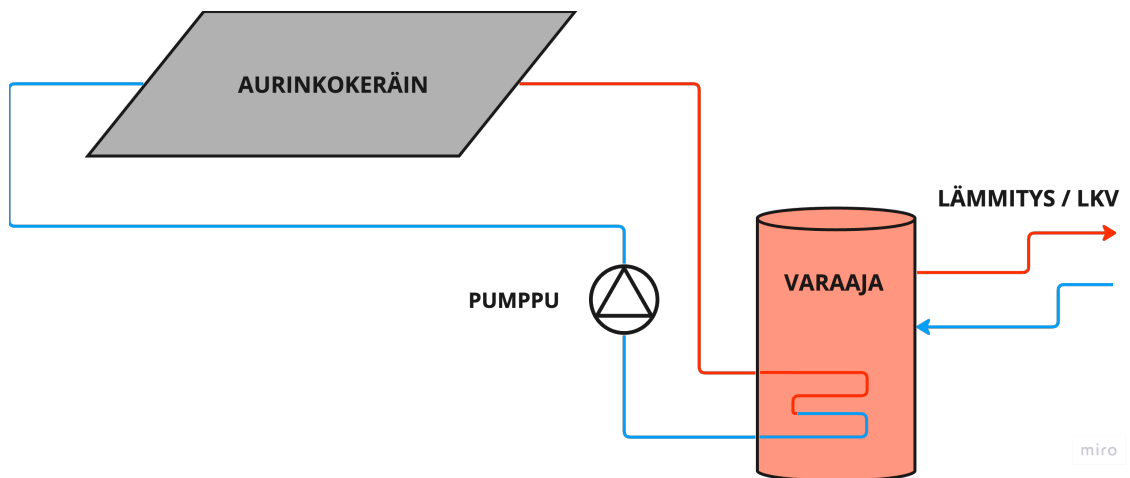
Taulukko 4. Aurinkopaneelijärjestelmien hiilijalanjälkiä eri kokoluokissa (Dodd ym. 2018, 31–34).

Järjestelmä	Elinkaaren hiilijalanjälki, g CO <sub>2</sub> e/kWh
Residential 3 kW + 2,5 kW invertteri	55,0
Commercial: 24,4 kW + 20 kW invertteri	52,1
Utility: 1,875 MW + 1500 kW invertteri	50,0

## 5.2 Aurinkolämpöjärjestelmät

Aurinkolämpöjärjestelmät perustuvat aurinkokeräajiin, jotka keräävät auringon energiaa lämmönsiirtonesteeseen. Lämmönsiirtonesteen avulla lämpöenergiaa siirretään suljetussa lämmönsiirtoputkistossa lämmönvaihtimen kautta lämmönvaraajaan (kuvio 7). (Motiva 2020a.) Kesäkäyttöisessä järjestelmässä lämmönsiirtonesteinä voidaan käyttää vettä, mutta ympärivuotisessa käytössä

käytettävän nesteen on oltava jäätymätöntä vesi-glykoliseosta (Harju 2010, 194).



Kuvio 7. Aurinkolämpöjärjestelmän yksinkertaistettu rakenne.

Nestekiertoisia keräimiä on pääsääntöisesti saatavilla kahta eri päätyyppiä: taso- ja tyhjiöputkikeräimiä. Tasokeräimet ovat yleisesti ottaen pohjoismaissa suosituimpi vaihtoehto. Lisäksi on olemassa keskittäviä keräimiä, jotka toimivat tehokkaasti suorassa ja voimakkaassa auringonpaisteessa. Tästä syystä keskittävät keräijät ovat olleet suosituimpia Suomessa lämpimillä alueilla. (Harju 2010, 193–194; Motiva 2022a.)

Nesteen sijaan lämmönsiirtoaineena voidaan käyttää myös ilmaa.

Ilmakeräimien hyötyjä ovat muun muassa ilman nopeampi lämpeneminen, järjestelmän helpompi toteuttaminen ja vuoto- ja korroosio-ongelmien puute. Ilmalla on kuitenkin alhaisempi lämpökapasiteetti, jolloin saman lämpömäärän toteuttaminen ilmakeräimellä vaatii suurempia kanavia ja keräinpintoja. Ilmakeräin soveltuu myös huonosti lämpimän käyttöveden lämmitykseen ja lämpimällä ilmalla lämmitetään yleensä suoraan käyttötiloja. (Motiva 2020b.) Tässä työssä ilmakeräimet ovat jätetty tarkastelun ulkopuolelle ja hiilijalanjälki-vertailussa käsitellään vain nestekiertoisia aurinkolämpöjärjestelmiä.

Koska aurinkolämpöjärjestelmän tuotanto on auringosta riippuvaista, ne soveltuvat huonosti kiinteistön ainoaksi lämmitysjärjestelmäksi. Parhaiten

aurinkolämpöjärjestelmät soveltuvat lämpimän käyttöveden tuotantoon kesäaikana. Aurinkolämpöjärjestelmät ovat usein osana esimerkiksi vesikiertoista sähkölämmitysjärjestelmää, kaukolämpöä, öljylämmitystä tai maalämpöjärjestelmää. (Perälä 2017, 21.)

### 5.2.1 Aurinkolämpöjärjestelmän osat ja tekniset käyttöiät

Aurinkolämpöjärjestelmä koostuu järjestelmän pääroolissa toimivien aurinkokeräinten lisäksi lämpövaraajasta ja lämmönsiirtoverkostosta pumppuineen, putkineen ja venttiileineen (Motiva 2020c). Lämmönsiirtoverkon tekniset käyttöiät käsiteltiin kaukolämpöjärjestelmän käsittelyn yhteydessä luvussa *4.1.1 Kaukolämpöjärjestelmän osat ja tekniset käyttöiät*.

Rakennustieto Oy:n (2008, 15) ohjekortin mukaan vesikiertoisten aurinkokeräinten tekninen käyttöikäoletus on 10–20 vuotta normaalissa rasitusluokassa. Uudempien lähteiden perusteella aurinkokeräinten yleinen käyttöikäoletus on kuitenkin noin 30 vuotta (Auvinen 2016; Hiilihelppi n.d.; Motiva 2020d). Myös lämpövaraajien tyypillinen käyttöikäoletus on noin 30 vuotta, jolloin sekä lämpövaraajien ja aurinkokeräinten uusiminen vähintään kerran tarkasteluajanjakson aikana on suositeltavaa (Rakennustieto Oy 2008, 14). (Taulukko 5.)

Taulukko 5. Aurinkolämpöjärjestelmien osien tekniset käyttöikäoletukset.

Nimike	Keskimääräinen tekninen käyttöikä, normaali rasitusluokka
<b>Aurinkokeräimet, yleisesti</b>	n. 30 vuotta (Auvinen 2016; Hiilihelppi n.d.; Motiva 2020d)
<b>Aurinkokeräimet, vesikiertojärjestelmä</b>	10...20 vuotta (Rakennustieto Oy 2008, 15)
<b>Lämpövaraajat</b>	30 vuotta (Rakennustieto Oy 2008, 14)
<b>Lämmönsiirtoverkosto</b>	ks. <i>4.1.1 Kaukolämpöjärjestelmän osat ja tekniset käyttöiät</i>

### 5.2.2 Aurinkolämpöjärjestelmän hiilijalanjälki

Vertailtaessa aurinkolämpöjärjestelmän hiilijalanjälkeä muihin järjestelmiin on hyvä huomioida, että järjestelmä vaatii tuekseen jonkin muun lämmitysjärjestelmän. Tällöin aurinkolämpöön turvautuvan järjestelmän hiilijalanjälkeä tarkasteltaessa on myös huomioitava kyseisen rinnakkaisjärjestelmän hiilijalanjälki.

#### Järjestelmän sähkönkulutus

Kun järjestelmän suunnitteluarvoista ei ole olemassa yksityiskohtaista tietoa, kuten on tämän tutkimustyön tapauksessa, voidaan järjestelmän pumpun tehoa määriteltäessä käyttää kaavaa (Heimonen 2011, 14)

$$P = \frac{50 + 5 * A_{aurinkokeräin}}{1000}$$

jossa

$P$  = Järjestelmän pumpun teho, kW

$A_{aurinkokeräin}$  = Järjestelmän aurinkokeräinten pinta-ala, m<sup>2</sup>

Pumpun vuosittaista energiankulutusta laskettaessa voidaan käyttää oletusarvoista käyttöajan arvoa 2000 h/a, kun tarkempaa käyttötietoa ei ole saatavilla (Heimonen 2011, 14).

#### Tutkimustuloksia järjestelmän hiilijalanjäljestä

CO<sub>2</sub>datan (2023f) aurinkolämpökeräinten tuotevaiheen A1–A3 konservatiivinen ilmastaselvityksen laskennassa käytettävä päästökerroin on 6,21 kg CO<sub>2</sub>e/kg. Muutoskerroimen ollessa (kg/m<sup>2</sup>) 17,5 saadaan yhden neliömetrin kokoisen aurinkolämpökeräimen tuotevaiheen keskiarvoiseksi GHG-päästöiksi noin 108,7 kg CO<sub>2</sub>e. Purkujätteen käsittelyn (C3) keskimääräiseksi päästökertoimeksi on

annettu 0,21 kg CO<sub>2</sub>e/kg, jolloin purkujätteen käsittelyn GHG-päästöt yhtä neliometriä kohden ovat noin 3,7 kg CO<sub>2</sub>e. (CO<sub>2</sub>data 2023f.)

Iso-Britanniassa vuonna 2009 julkaistussa LCA-tutkimuksessa selvitettiin kolmen makuuhuoneen asunnon lämpimän käyttöveden tarpeisiin asennetun 6,09 m<sup>2</sup> tasokerääjiston hiilijalanjälkeä, kun mukaan laskettiin myös vesivaraaja ja tukirakenteet. Tutkimuksen tarkasteluajanjaksona käytettiin järjestelmän valmistajan määrittelemää 20 vuoden käyttöikää. Tutkimuksessa huomioitiin raaka-aineiden, valmistuksen, kuljetusten, asennusten ja käytönaikaisten huoltotoimenpiteiden päästöt elinkaarianalyysin ISO-standardija seuraten. Lopputuloksena tutkimuksessa saatiin järjestelmän hiilijalanjäljeksi 1439,10 kg CO<sub>2</sub>e. Kyseinen tasokerääjä kykenee tuottamaan lämpöä noin 0,7 kW/m<sup>2</sup>. Tämän perusteella tutkimuksessa kerääjän päästökertoimeksi saatiin noin 343 kg CO<sub>2</sub>e/kW tai noin 236 kg CO<sub>2</sub>e/m<sup>2</sup>. (Menzies & Roderick 2009, 3–5.)

Teollisen mittaluokan aurinkolämpöjärjestelmiä ja niiden ympäristövaikutuksia eri Euroopan maissa vertailleen tutkimuksen tuloksissa voidaan huomata maan sijainnin ja keskiarvoisen aurinkoenergian määrän vaikuttavan huomattavasti aurinkolämpöjärjestelmän hiilijalanjälkeen. Tutkimuksessa tarkasteltiin eri kokoluokan järjestelmiä 20 vuoden tarkasteluajanjaksolla rajaten pois elinkaaren lopun päästöt. Tutkimuksen mukaan hiilijalanjälki koko elinkaaren aikana vaihteli Ateenan 1 820 kg CO<sub>2</sub>e/kW ja Oslon 4 070 kg CO<sub>2</sub>e/kW välillä johdonmukaisesti hiilijalanjäljen kasvaessa, mitä pohjoisempi kaupungin sijainti oli. Eron suuruus korostuu huomioiden, että tutkimuksessa otettiin huomioon eri maiden erilainen energiatuotantorakenne. Esimerkiksi Norjassa energiaa tuotetaan keskimääräisesti huomattavasti puhtaammin verrattuna Etelä-Euroopan maihin. (Kylili et al 2017, 106–108.)

Tutkimuksen mukaan järjestelmän tuotevaiheiden A1–A3 kasvihuonekaasupäästöt olivat keskimäärin noin 330 kg CO<sub>2</sub>e/kW. Tutkimuksen järjestelmässä neliometriä kohden laskettu teho oli 0,7 kW/m<sup>2</sup>, jolloin keräinneliötä kohden päästöt olivat keskimäärin 231 kg CO<sub>2</sub>e/m<sup>2</sup>. (Kylili et al 2017, 102–107.) Verraten edellä mainituissa tutkimustuloksissa saatuja elinkaaren kasvihuonekaasupäästöjä neliötä kohden kansallisen

päästötietokannan tasokerääjän tuotevaiheen ja elinkaaren loppuvaiheen päästöihin, voidaan tulosten perusteella tulkita keräimien muodostavan noin puolet aurinkolämpöjärjestelmän päästöistä.

Järjestelmässä käytettävien pumppujen ja lämmönsiirtoputkien päästökertoimina käytetään kansallisesta päästötietokannasta löytyviä tietoja. Lämpövaraajille ei toistaiseksi löydy päästötietoja kansallisesta päästötietokannasta. Saksalainen Ökobaudat-ympäristöselostetietokannasta löytyy tavanomaista saksalaista teknologiaa edustavia päästötietoja suomalaisen kansallisen päästötietokanta CO2datan tapaisesti. Ökobaudatiin kerätyt päästötietokannat pohjautuvat III-tyyppin ympäristöstandardeja ohjeistavaan standardiin EN 15804. Tietokannasta löytyviä lämpövaraajien päästötietoja käytetään tämän työn hiilijalanjätkilaskennassa (taulukko 6).

Taulukko 6. Aurinkolämpöjärjestelmän osien hiilijalanjälkitietoja

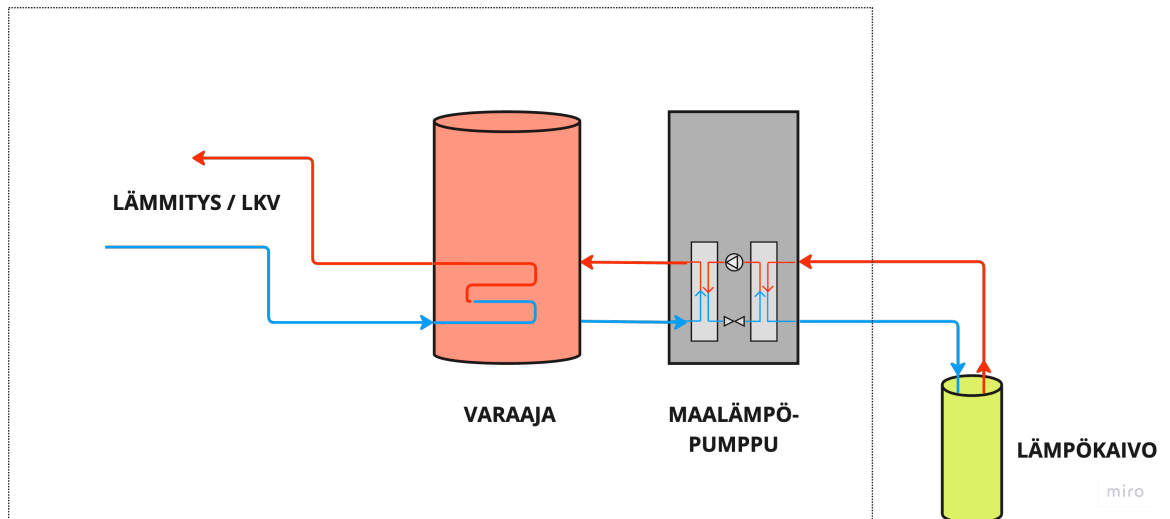
Järjestelmäosa	A1-A3 kgCO <sub>2</sub> e/kpl	C3 kgCO <sub>2</sub> e/kpl	C4 kgCO <sub>2</sub> e/kpl	D1 kgCO <sub>2</sub> e/kpl	D2 kgCO <sub>2</sub> e/kpl
Vesipumppu (CO2data, 2023a)	46,475	0,013	–	-5,2	-0,26
Lämpövaraaja, 500 litraa, ruostumaton teräs (Ökobaudat, 2022a)	352,94	50,53	0,078	-93,69	–
Lämmönsiirtoputki, PEX (CO2data, 2023a)	0,64448	0,636	–	–	-0,042

### 5.3 Maalämpö

Maalämpö perustuu maahan sitoutuneen auringon säteilyenergian hyödyntämiseen. Maalämpöjärjestelmässä maahan kertynyttä lämpöä kerätään keruupiirissä virtaavan lämmönsiirtonesteen avulla. Keruupiiriin lämmönkeruuputkisto voi olla tilanteen mukaan noin metrin syvyyteen kaivettu horisontaalinen järjestelmä tai lämpökaivoihin perustuva vertikaalinen järjestelmä. Lämpökaivojärjestelmä on paremman tehokkuutensa ja pienemmän pinta-alatarpeensa vuoksi nykyisin näistä kahdesta yleisempi.

Lämmönkeruuputkisto voidaan myös tilanteen mukaan sijoittaa maan sijasta vesistöön. Maalämpö voidaan joko mitoittaa kattamaan koko kiinteistön lämmitystarve tai sitä voidaan hyödyntää osana hybridijärjestelmää esimerkiksi suoran sähkölämmityksen kanssa. (Tom Allen Senera n.d.a)

Lämpöpumppujärjestelmissä lämmöntuotanto perustuu lämmönkeruunesteen olomuodonmuutoksiin. Lämmönkeruunesteen maasta keräämä lämpö johdetaan lämpöpumpulle, jossa neste höyrystetään. Höyrystynyt lämmönsiirtoaine pakotetaan kompressorin avulla takaisin nesteeksi, jolloin aineen lämpötila nousee. Kuumentuneesta nesteestä lämpö siirretään lämmönsiirtimen välityksellä lämmitys- ja käyttövesiverkoston, usein lämminvesivaraajan kautta. (Tom Allen Senera n.d.a) (Kuvio 8.)



Kuvio 8. Maalämpöjärjestelmän yksinkertaistettu rakenne.

### 5.3.1 Maalämpöjärjestelmän osat ja tekniset käyttöiät

Maalämpöjärjestelmän keskeisimmät osat ovat maalämpöpumppu ja maalämmön keruupiiri. Maalämmön keruupiiriin kuuluu yleensä lämmönkeruuputkiston osana lämpökaivoja, joiden tekninen käyttöikäoletus on Rakennustieto Oy:n (2008, 15) mukaan sama kuin rakennuksen käyttöikä. Maalämpöpumpuille määritelty tekninen käyttöikäoletus on 25–30 vuotta, mutta lämpöpumpun kompressorit saatetaan joutua vaihtamaan jo 10–15 vuoden



sisällä käyttöönotosta (Rakennustieto Oy 2008, 15). Järjestelmän lämmönsiirtoverkko osineen käsiteltiin kaukolämmön käsittelyn yhteydessä luvussa *4.1.1 Kaukolämpöjärjestelmän osat ja tekniset käyttöiät*. (Taulukko 7.)

Taulukko 7. Maalämpöjärjestelmän osien tekniset käyttöikäoletukset (Rakennustieto Oy, 2008, 14–15).

Nimike	Keskimääräinen tekninen käyttöikä, normaali rasisitusluokka
<b>Maapiiri ja lämpökaivot</b>	Rakennuksen ikä
<b>Maalämpöpumppu</b>	25... 30 vuotta
<b>Lämpöpumpun kompressori</b>	10... 15 vuotta
<b>Lämpövaraaja</b>	30 vuotta
<b>Lämmönsiirtoverkosto</b>	ks. <i>4.1.1 Kaukolämpöjärjestelmän osat ja tekniset käyttöiät</i>

### 5.3.2 Maalämpöjärjestelmän hiilijalanjälki

Yleisesti lämpöpumppujen hiilijalanjälkeä tarkasteltaessa on hyvä kiinnittää huomiota niissä kylmäaineina käytettyihin fluorattuihin kasvihuonekaasuihin eli F-kaasuihin, joilla on suuri ilmastoa lämmittävä vaikutus. Näitä ovat mm. HFC-yhdisteet sekä rikkiheksafluoridi. Laitteistojen asianmukaisella asennuksella, huollolla ja jätehuollolla voidaan minimoida niiden aiheuttamat ylimääräiset kasvihuonekaasupäästöt. Tiukentuvilla rajoituksilla ja kielloilla pyritään vähentämään F-kaasupäästöjä ilmakehään. Esimerkiksi ilmalämpöpumput, joissa on alle 3 kg F-kaasuja, joiden GWP on vähintään 750 kielletään EU-markkinoilla 1.1.2025 alkaen. (SYKE 2023.)

### Järjestelmän sähkönkulutus

Maalämpöjärjestelmän energiantuotanto voidaan nähdä olevan maalämmön osalta lähes päästötöntä. Lämpöpumppujärjestelmä vaatii kuitenkin sähköä toimiakseen, jolloin maalämmön energiantuotannon hiilijalanjälki riippuu käytetyn sähkön tuotantotavasta ja sen hiilijalanjäljestä.

Lämpöpumppujen sähkönkulutukseen vaikuttaa lämpöpumpun hyötysuhde, jota kuvaa tarkimmin SPF (Seasonal Performance Factor). SPF-arvo on lämpöpumpun vuosihyötysuhde, joka ottaa huomioon myös lämpimän käyttöveden tuotannon. Lämpöpumppujen hyötysuhteen arvona on käytetty myös COP-arvoa, joka ei kuitenkaan ota huomioon ulkolämpötilan ja olosuhteiden vaihtelua. Myös vuoden aikojen vaihtelut huomioon ottava SCOP-arvo jättää LKV-tuotannon huomioimatta. (Motiva 2017, 67–68.)

Suomessa maalämpöpumppujen SPF-arvot vaihtelevat tilojen lämmityksen osalta yleensä 2,5–3,5 välillä. LKV-tuotannolle SPF-arvo maalämpöjärjestelmissä on yleensä 2,3. SPF-lukuun vaikuttaa järjestelmän menoveden lämpötila sekä keruupiiriin vuotuinen paluunesteen keskilämpötila. (Taulukko 8.)

Taulukko 8. Maalämpöpumppujen SPF-lukuja (Eskola ym. 2012, 11).

Maalämpöpumppu max. lämpötila (menovesi), °C	SPF-luku	
	Vuotuinen keruupiirin paluunesteen keskilämpötila, °C	
	-3	+3
Tilojen lämmitys		
30	3,4	3,5
40	3,0	3,1
50	2,7	2,7
60	2,5	2,5
Käyttöveden lämmitys		
60	2,3	2,3

SPF-arvoa käytetään ostoenergiankulutuksen laskennassa lämmityksen sähköenergiankulutuksen kaavan mukaisesti (Eskola ym. 2012, 10).

$$W_{LP,lämmitys} = \frac{Q_{LP,lämmitys,tilat}}{SPF_{tilat}} + \frac{Q_{LP,lämmitys,LKV}}{SPF_{LKV}}$$

jossa

$W_{LP,lämmitys}$  = lämmityksen sähköenergian kulutus, kWh

$Q_{LP,lämmitys,tilat}$  = lämpöpumpun tuottama tilojen lämmitysenergia, kWh

$Q_{LP,lämmitys,LKV}$  = lämpöpumpun tuottama käyttöveden lämmitysenergia, kWh

$SPF_{tilat}$  = Lämpöpumpun SPF-luku tilojen lämmityksessä

$SPF_{LKV}$  = Lämpöpumpun SPF-luku lämpimän käyttöveden lämmityksessä

Esimerkiksi, kun lämpöpumpulla lämmitetään tiloja 100 kWh sekä lämmintä käyttövettä 100 kWh kuluu sähköenergiaa, kun  $SPF_{tilat} = 3,0$  ja  $SPF_{LKV} = 2,3$

$$\frac{100 \text{ kWh}}{3,0} + \frac{100 \text{ kWh}}{2,3} \approx 33,33 \text{ kWh} + 43,48 \text{ kWh} \approx 76,81 \text{ kWh}$$

Kaavasta voidaan huomata, että suurempi SPF-arvo laskee lämpöenergiantuottamiseksi kulutetun sähkön määrää. Tuloksen pohjalta voidaan laskea lämmityksen sähkönkäytön hiilijalanjälki esimerkiksi tilastokeskuksen julkaiseman vuosien 2019–2021 sähköntuotannon keskiarvoisella päästökertoimella 77 g CO<sub>2</sub>/kWh (Motiva 2023b).

$$76,81 \text{ kWh} * 77 \text{ g} \frac{\text{CO}_2}{\text{kWh}} \approx 5,9 \text{ kg CO}_2$$

### Tutkimustuloksia järjestelmän hiilijalanjäljestä

Kansallisen päästötietokannan tiedoista ei toistaiseksi löydy päästötietoja maalämpöpumpuille ja -järjestelmille. Saksalaisesta Ökobaudat-ympäristöselostetietokannasta löytyy päästötietoja eri kokoluokan lämpöpumpuille sekä niiden lämmönkeruuverkostoille. Näitä tietoja

hyödynnetään osana maalämpöjärjestelmien elinkaaren päästöjen laskentaa. (Taulukko 9.)

Taulukko 9. Maalämpöjärjestelmien hiilijalanjälkitietoja (Ökobaudat 2022b–g).

Järjestelmäosa	A1-A3 kgCO <sub>2</sub> e/kpl	C3 kgCO <sub>2</sub> e/kpl	C4 kgCO <sub>2</sub> e/kpl	D1 kgCO <sub>2</sub> e/kpl
Lämpöpumppu 10 kW	837	4,282	0,199	-128,3
Lämpöpumppu 20 kW	909	4,282	0,119	-128,3
Lämpöpumppu 70 kW	6 070	11,35	0,193	-217,6
Lämmönkeruuverkosto 10 kW	188,8	–	–	–
Lämmönkeruuverkosto 20 kW	551,5	–	–	–
Lämmönkeruuverkosto 70 kW	5 843	–	–	–

Gebwell on laatinut kolmelle eri lämpöpumppumallilleen ympäristötuoteselosteet EN 15804 ja ISO 14025 -standardien mukaisesti (taulukko 10).

Kyseiset lämpöpumput on suunniteltu isompien kiinteistöjen lämmöntuotantoon. Keskimääräisinä kuljetusmatkoina on tutkimuksessa käytetty A4 vaiheessa 338 km ja C2 vaiheessa 75 km. Vaihe D ottaa huomioon uudelleenikäytön ja kierrätyksen sekä energian talteenoton. (Seppänen & Apilo 2023, 23–24.)

Ympäristöselosteessa päästöarvot ovat Ökobaudatin geneeriseen lämpöpumppujärjestelmätietoon verrattuna huomattavasti pienemmät. Tämä oletettavasti johtuu siitä, että Ökobaudatin laskelmissa on mukana itse lämpöpumpun lisäksi myös muita järjestelmäosia, kuten putkistoa. (Ökobaudat 2022b–g.)

Taulukko 10. Gebwell Taurus -lämpöpumppujen elinkaaren hiilijalanjälki (Seppänen & Apilo 2023, 23–24).

Tuote	A1-A3 kg CO <sub>2</sub> e	A4 kg CO <sub>2</sub> e	A5 kg CO <sub>2</sub> e	C2 kg CO <sub>2</sub> e	C3 kg CO <sub>2</sub> e	D kg CO <sub>2</sub> e
Taurus 80 EVI	3 610	0,0311	0,0234	0,0118	0,350	-1,09
Taurus 110 EVI	3 630	0,0311	0,0233	0,0118	0,351	-1,16
Taurus Inverter Pro	3 780	0,0310	0,0202	0,0118	0,362	-1,08
Keskiarvo	3 673	0,0311	0,0223	0,0118	0,354	-1,11

Rakennustieto Oy:n (2008, 15) mukaan maalämpöpumppujen kompressorit voidaan joutua vaihtamaan jo ennen itse lämpöpumpun uusimista. Danfoss on laatinut ympäristöselosteen standardien ISO 14040, ISO 14044 ja EN 15804+A2 mukaisesti muun muassa lämpöpumppukäyttöön tarkoitettulle kompressorimallille Turbocor® TTH375. Ympäristöselosteessa kuljetusmatkoiksi valmistajalta asiakkaalle vaiheessa A4 määriteltiin 650 km kuorma-autolla ja 7136 km konttialuksella. (Danfoss Climate Solutions 2023.) Ympäristöselosteen arvoja tuotevaiheille A1–A3, elinkaaren lopun vaiheille C3–C4 sekä hiilikädenjäljelle D hyödynnetään osana hiilijalanjälkilaskuria (taulukko 11). Ympäristöselosteessa käsitellyjä käyttövaiheen energiakäytöstä muodostuvia päästöjä ei huomioida tässä työssä, sillä käyttövaiheen energiakäytön päästöjä arvioidaan koko lämpöpumpun SPF-arvoa hyödyntäen.

Taulukko 11. Kompressorin hiilijalanjälki (Danfoss Climate Solutions 2023).

Tuote	A1-A3 kg CO <sub>2</sub> e	A4 kg CO <sub>2</sub> e	A5 kg CO <sub>2</sub> e	C2 kg CO <sub>2</sub> e	C3 kg CO <sub>2</sub> e	C4 kg CO <sub>2</sub> e	D1 kg CO <sub>2</sub> e
Danfoss TTH375	1 870	22,3	1,36	1,35	13,5	11,17	-131,9

Bonamenten ja Aquinon (2019) tutkimuksessa selvitettiin kolmen eri maalämpöpumppujärjestelmän elinkaaren ympäristövaikutuksia ISO 14040- ja 14044 -standardien periaatteiden mukaisesti. Tarkasteluun valittu kiinteistö kuluttaa lämmitys- ja viilennysenergiaa yhteensä 24 883 kWh vuodessa 17 kW huipputeholla. Tutkimuksen perustason järjestelmä koostuu 17 kW lämpöpumpusta sekä kolmesta 120 m syvästä lämpökaivosta, joiden keskimääräinen lämpökapasiteetti on 46,5 W/m. Vertailussa mukana oli kaksi vastaavaa järjestelmää, joissa oli 17 kW lämpöpumpun lisäksi yksi lämpökaivo ja energiavaraaja (TES). Toinen energiavaraajista oli 12 m<sup>3</sup> betoninen vesitäytteenäinen lämpötankki (SH-TES) ja toinen 1 m<sup>3</sup> PCM-varasto (PCM-TES). Tutkimuksen toiminnallisena yksikkönä toimi 1 kWh tuotettua energiaa. (Bonamente & Aquino 2019, 193–198.)

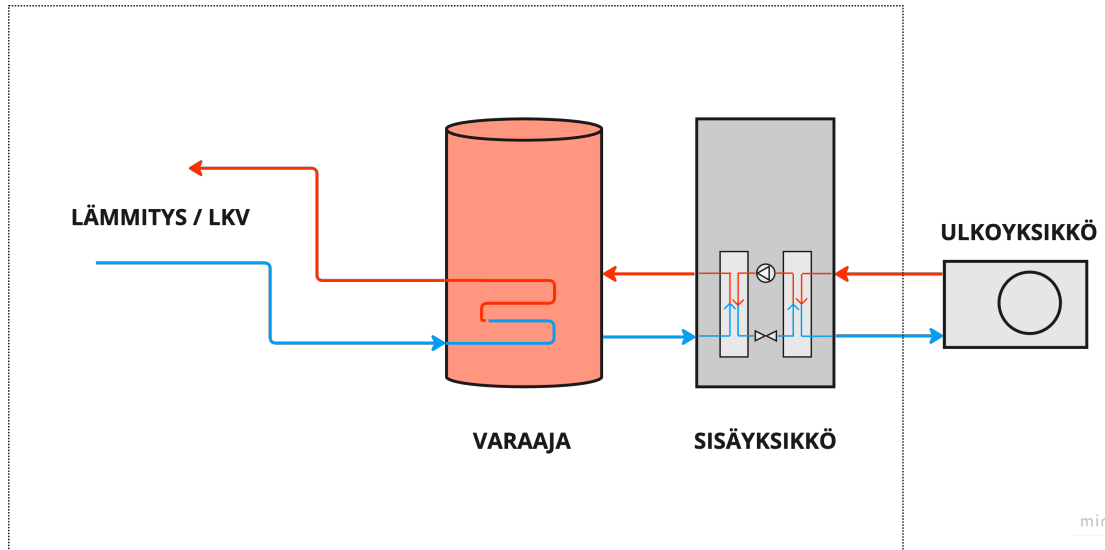
Tutkimuksen tuloksista selvisi, että perustason järjestelmän hiilijalanjälki oli 1,30 kg CO<sub>2</sub>e/kWh, kun lämpöpumppu käytti ostosähköä ja 0,0356 kgCO<sub>2</sub>e/kWh, kun lämpöpumpun käyttämä sähkö oli tuotettu aurinkopaneeleilla. Ostosähköä käytettäessä lämmityksen ja viilennyksen osuus hiilijalanjäljestä oli yhteensä 87,9 prosenttia, kun aurinkopaneeleilla tuotetun sähkön myötä osuus laski 55,7 prosenttiin. Lämpökaivojen ja lämpöpumpun valmistuksen osuudet olivat 7,2 ja 4,9 prosenttia, kun aurinkosähköä käytettäessä osuudet nousivat 26,4 ja 18,0 prosenttiin. (Bonamente & Aquino 2019, 201–202.)

Tuloksia voidaan verrata myös vuonna 2013 tehtyyn tutkimukseen, jossa ostosähköön turvautuvan maalämpöjärjestelmän lämpökaivojen osuus hiilijalanjäljestä oli 16,84 prosenttia ja lämpöpumppujen osuus 16,84. Aurinkosähköä hyödynnettäessä prosenttiosuudet nousivat lämpökaivojen osalta jopa 57,7 prosenttiin ja lämpöpumppujen osalta 34,88 prosenttiin. (Russo et al 2014, 20). Tutkimusten tuloksista voidaan huomata lämpökaivojen ja lämpöpumpun suhteellisen merkityksen kasvavan merkittävästi, kun siirrytään kohti vähäpäästöisempää sähköntuotantoa.

#### 5.4 Ilmalämpöpumput

Ilmalämpöpumppujen toiminta perustuu samaan lämpöpumppumeکانismissiin, joka käsiteltiin luvussa 5.3. *Maalämpö*, mutta lämmönkeruunesteen keräämä lämpö otetaan talteen maaperän sijaan ulkoilmasta. Ilmalämpöpumput voidaan jakaa ilma-ilmalämpöpumppuihin ja ilma-vesilämpöpumppuihin.

Ilma-ilmalämpöpumpuissa, joita tavallisesti kutsutaan yksinkertaistetusti ilmalämpöpumpuiksi, ulkoilmasta kerätty lämpö puhalletaan suoraan sisäilmaan. Ilma-vesilämpöpumput, joista käytetään myös lyhenteitä IVLP ja VILP, siirtää ulkoilmasta kerätyn lämmön talon lämmitysverkoston veteen maalämpöpumpun tapaan. Ilma-vesilämpöpumppua voidaankin käyttää tilojen lämmitysenergian tuotannon lisäksi myös lämpimän käyttöveden tuotantoon. (Kuvio 9.)



Kuvio 9. Ilma-vesilämpöpumpputjärjestelmän yksinkertaistettu rakenne.

#### 5.4.1 Ilmalämpöpumpputjärjestelmän osat ja tekniset käyttöiät

Ilmalämpöpumpputjärjestelmissä keskeisin elementti on lämpöpumppu itsessään. Ilma-ilmalämpöpumpputjärjestelmät koostuvat lämpöpumpun ulko- ja sisäyksiköistä. Ilma-vesilämpöpumpputjärjestelmät tarvitsevat toimiakseen lisäksi lämmönsiirtoputkiston putkineen, venttiileineen ja varolaitteineen. Lisäksi IVLP-järjestelmässä on syytä olla mukana lämmönvaraaja, jolla voidaan tasata esimerkiksi lämpimän käyttöveden kulutuksen aiheuttamia lämmönkulutuspiikkejä.

Rakennustieto Oy:n (2008, 15) ohjekortin mukaan ilmalämpöpumpputjen tekninen käyttöikäarvio on maalämpöpumpputeihin nähden huomattavasti lyhyempi. Kun maalämpöpumpputeille on määritelty 25–30 vuoden tekninen käyttöikäarvio, ilmalämpöpumpputjen käyttöikäarvio jää vain 10–15 vuoteen (taulukko 12). Ilmalämpöpumpputjen huomattavasti lyhyempi vaihtoväli kasvattaa 50 vuoden tarkasteluajanjaksolla järjestelmän uusimisien aiheuttamia kasvihuonekaasupäästöjä, mikä on hyvä huomioida järjestelmiä vertailtaessa.

Taulukko 12. Ilmalämpöpumppujärjestelmien osien tekniset käyttöikäoletukset (Rakennustieto Oy 2008, 14–15).

Nimike	Keskimääräinen tekninen käyttöikä, normaali raskuusluokka
<b>Ilmalämpöpumput</b>	10...15 vuotta
<b>Lämpövaraaja</b>	30 vuotta
<b>Lämmönsiirtoverkosto</b>	ks. 4.1.1 <i>Kaukolämpöjärjestelmän osat ja tekniset käyttöiät</i>

Rakennustieto Oy:n ohjekortissa ei ole määritelty vesi-ilmalämpöpumpuille omaa erillistä teknistä käyttöikäarviota, jolloin käyttöiäksi voidaan olettaa ohjekortissa ilmalämpöpumpuille yleisesti todettu 15 vuotta. Tätä näkemystä tukee myös Huomon (2022, 47) opinnäytetyön tulokset, jotka perustuvat alan asiantuntijoilta kerättyyn haastattelutietoon koskien lämpöpumppujärjestelmien käyttöikä.

#### 5.4.2 Ilmalämpöpumppujärjestelmän hiilijalanjälki

##### **Järjestelmän sähkönkulutus**

Ilmalämpöpumppujen sähkönkulutus riippuu maalämpöpumpun tavoin SPF-luvusta, jonka käyttöä pumpun sähkönkulutuksen laskemiseen käsiteltiin luvussa 5.3.2 *Maalämpöjärjestelmän hiilijalanjälki*. Suomessa ilma-ilmalämpöpumppujen SPF-luku on yleisesti pohjoista Suomea lukuun ottamatta 2,8 (taulukko 13).

Ilma-vesilämpöpumppujen SPF-arvoille on määritelty säävyöhykkeiden ja lämmityksen menoveden lämpötilan perusteella taulukkoarvot, jotka vaihtelevat tilojen lämmityksessä 2,0–2,8 välillä ja lämpimän käyttöveden lämmityksessä 1,3–1,8 välillä (taulukko 13). SPF-arvoja vertailtaessa voidaan huomata maalämpöpumppujen käyttävän yleisesti vähemmän sähköä samaa lämmitysenergiämäärää kohden kuin ilmalämpöpumput.



Taulukko 13. Ilmalämpöpumppujen SPF-lukuja (Eskola ym. 2012, 11).

Ulkoilmalämpöpumppu max. lämpötila (menovesi), °C	SPF-luku		
	Säävyöhykkeet		
	I-II	III	IV
Ilma-Ilma	2,8	2,8	2,7
Ilma-vesi (lämmitys)			
30	2,8	2,8	2,7
40	2,5	2,5	2,4
50	2,3	2,3	2,2
60	2,2	2,1	2,0
Ilma-vesi (LVK)			
60	1,8	1,6	1,3

### Tutkimustuloksia järjestelmän hiilijalanjäljestä

Kansallisessa päästötietokannassa on määritelty geneerinen taulukkoarvo ilma-ilmalämpöpumppujen GHG-päästöille. CO<sub>2</sub>datan (2023g) ilma-ilmalämpöpumppujen tuotevaiheen A1–A3 ilmastaselvityksen laskennassa käytettävä konservatiivinen päästökerroin on 20,48 kg CO<sub>2</sub>e/kg.

Muutokertoimen ollessa 50,5 kg/laite saadaan yhden ilma-ilmalämpöpumpun tuotevaiheen keskiarvoiseksi GHG-päästöiksi noin 1034 kg CO<sub>2</sub>e.

CO<sub>2</sub>datan tietokannasta ei toistaiseksi löydy erikseen ilma-vesilämpöpumpuille päästökertoimia. Saksalaisen Ökobaudat-ympäristöselostetietokannan järjestelmistä löytyy päästötietoja elinkaaren vaiheet eritellen 7 kW, 10 kW ja 14 kW ilma-vesilämpöpumpuille. Näiden päästötietojen pohjalta ilma-vesilämpöpumppujen tuotevaiheen A1–A3 päästöt vaihtelevat noin 320–640 kg CO<sub>2</sub>e/laite välillä. (Taulukko 14.)

Taulukko 14. Ilma-vesilämpöpumppujen kasvihuonekaasupäästökertoimia (Ökobaudat 2022h–f.)

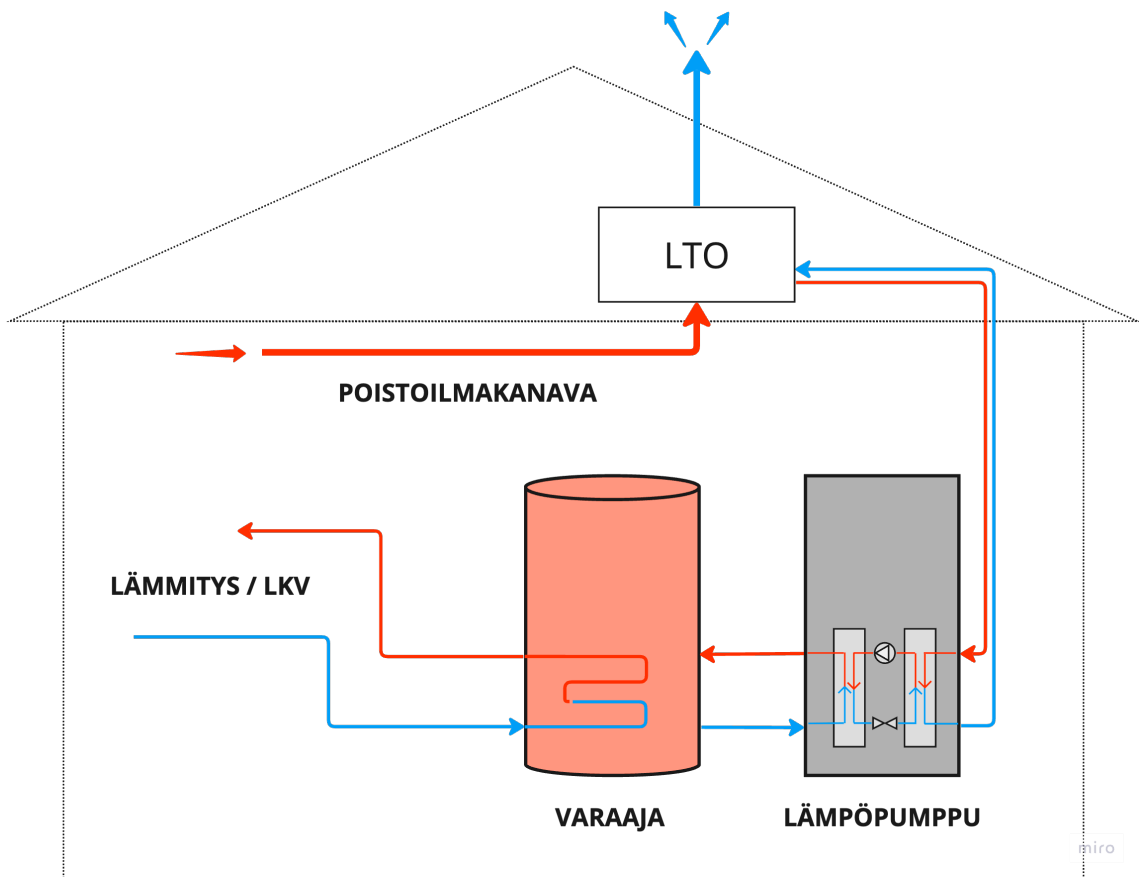
Järjestelmäosa	A1-A3 kgCO <sub>2</sub> e/kpl	C3 kgCO <sub>2</sub> e/kpl	C4 kgCO <sub>2</sub> e/kpl	D1 kgCO <sub>2</sub> e/kpl
Lämpöpumppu 7 kW	319,40	20,37	3,586	-134,6
Lämpöpumppu 10 kW	456,20	29,1	5,122	-192,2
Lämpöpumppu 14 kW	638,70	40,74	7,171	-269,1

Vuonna 2011 Iso-Britanniassa tehdyssä tutkimuksessa selvitettiin ilmalämpöpumppujen elinkaaren hiilijalanjälkiä. Tutkimuksissa vertailtiin erilaisiin kiinteistöihin asennettuja pumppuja ja niiden hiilijalanjälkeä 15 vuoden elinkaaren aikana. Tutkimuksen rajaukseksi oli määritelty cradle-to-grave. Tutkimuksessa huomioitiin ja eriteltiin myös oletettu F-kaasujen vuoto, jonka vuosittainen määrä määriteltiin 6 prosenttiin nimellistäyttömäärästä. Elinkaaren lopun F-kaasu vuodoksi määriteltiin 55 prosenttia täyttömäärästä. Sähköntuotannon kertoimena tutkimuksessa käytettiin 542,84 kg CO<sub>2</sub>e/MWh.

Tutkimuksen mukaan koko elinkaaren GHG-päästöt tuotettua energiaa kohti olivat keskimäärin 0,66 kg CO<sub>2</sub>e/kWh. Tutkimuksen perusteella keskimääräisesti 81 prosenttia elinkaaren päästöistä syntyi sähkönkäytöstä ja vain 2 prosenttia laitteiden tuotannosta ja jätehuollosta. F-kaasujen tuotannon ja vuodon vaikutus oli 16 prosenttia. (Johnson 2010, 3–8.) Tutkimuksessa selvitettyä järjestelmien elinkaaren päästöjä tarkastellessa on huomioitava Suomen nykyisiä sähköntuotannon päästökertoimia huomattavasti korkeampi sähköntuotannon päästökerroin. Tutkimuksen perusteella voidaan todeta lämpöpumppujen F-kaasupäästöillä olevan suuri merkitys kokonaispäästöihin. Tulos huomioiden F-kaasujen käytölle tuloillaan olevat uudet rajoitukset ovat ilmastonlämpenemisvaikutus huomioiden perusteltuja (SYKE 2023).

## 5.5 Poistoilmalämpöpumppu

Poistoilmalämpöpumpun eli PILP:n toimintaperiaate on pohjimmiltaan sama kuin muissakin lämpöpumpputerjestelmissä. Lämpöpumpputerjestelmien toimintaperiaate käsiteltiin luvussa 5.3. *Maalämpö*. PILP:lla tuotettava lämpö saadaan ulkoilman ja maaperän sijasta koneellisen ilmanvaihdon mukana poistuvasta poistoilmasta. Poistoilman mukana poistuva hukkalämpö saadaan talteen poistoilmakanavan päähän sijoitettavalla lämmöntalteenottoyksiköllä eli LTO-yksiköllä. LTO-yksiköstä lämmennyt lämmönkeruuneste siirretään lämmönsiirtoputkiston avulla lämpöpumpulle. (Kuvio 10.)



Kuvio 10. Poistoilmalämpöpumpputerjestelmän yksinkertaistettu rakenne.

Poistoilmalämpöpumppu ei kykene toimimaan yksin rakennuksen ainoana lämmitysterjestelmänä. Hukkalämpö, josta lämpöä kerätään talteen, on täytynyt tuottaa jollakin rinnakkaisjärjestelmällä. Usein poistoilmalämpöpumppua

käytetään hyödyksi esimerkiksi maalämmön yhteydessä. LTO-laitteiston talteen keräämä lämpö voidaan yhdistää samaan lämmönkeruupiiriin maalämmön kanssa, jolloin samaa lämpöpumppuyksikköä voidaan käyttää osana molempia järjestelmiä. LTO:n ollessa yhdistettynä maalämmön keruupiiriin voidaan poistoilman lämpöä varastoida lämpiminä vuodenaikoina maaperään. (Tom Allen Senera n.d.b.)

### 5.5.1 Poistoilmalämpöpumppujärjestelmän osat ja tekniset käyttöiät

PILP-järjestelmä koostuu lämpöpumpun ja lämmönsiirtoverkoston lisäksi lämmöntalteenottoyksiköstä sekä yleisesti myös lämmönvaraajasta. Maalämmön ja PILP:n hybridijärjestelmissä maalämpöpumppua käytetään yhteisesti osana molempia järjestelmiä. Lämpöpumppujen käyttöikä voidaan pitää maalämpöpumpuillekin määriteltä 25–30 vuotta. Lämpöpumpun kompressori saatetaan joutua vaihtamaan 10–15 vuoden päästä käyttöönotosta. Myös lämpövaraaja ja LTO:n pumppu voidaan joutua vaihtamaan jo ennen lämpöpumppua. LTO-putkiston tekninen käyttöikä kattaa tarkasteluajanjaksona olevan 50 vuotta. (Taulukko 15.)

Taulukko 15. Poistoilmalämpöpumppujen osien tekniset käyttöikäoletukset (Rakennustieto Oy 2008, 14–18).

Nimike	Keskimääräinen tekninen käyttöikä, normaali rasitusluokka
<b>Lämpöpumppu</b>	25...30 vuotta
<b>Lämpöpumpun kompressori</b>	10...15 vuotta
<b>LTO: putket</b>	50 vuotta
<b>LTO: pumput</b>	20...25 vuotta
<b>Lämpövaraaja</b>	30 vuotta
<b>Lämmönsiirtoverkosto</b>	ks. 4.1.1 Kaukolämpöjärjestelmän osat ja tekniset käyttöiät

## 5.5.2 Poistoilmalämpöjärjestelmän hiilijalanjälki

### Järjestelmän sähkönkulutus

Poistoilmalämpöpumppujen sähkönkulutus riippuu muiden lämpöpumppujen tavoin SPF-luvusta, jonka käyttöä pumpun sähkönkulutuksen laskemiseen käsiteltiin luvussa 5.3.2 *Maalämpöjärjestelmän hiilijalanjälki*.

Poistoilmalämpöpumpun SPF-luku riippuu jäteilmänä poistuvan ilman minimilämpötilasta ja luku vaihtelee yleensä välillä 1,9–2,4 (taulukko 16).

Taulukko 16. Poistoilmalämpöpumpun SPF-lukuja (Eskola ym. 2012, 11–12).

Poistoilmalämpöpumppu	SPF-luku
Jäteilman min. lämpötila	
-3	2,4
+1	2,1
+3	2,0
+5	1,9

### Tutkimustuloksia järjestelmän hiilijalanjäljestä

Koska poistoilmalämpöpumppuina voidaan käyttää samoja lämpöpumppulaiteita maalämmön kanssa, käytetään näiden hiilijalanjäljenlaskentaan luvussa 5.3.2 *Maalämpöjärjestelmän hiilijalanjälki* esiteltyjä arvoja lämpöpumpuille ja kompressoreille.

Poistoilmalämpöpumppujärjestelmässä tärkeässä osassa olevalle poistoilman lämmöntalteenottolaitteistolle on määritelty kansallisessa päästötietokannassa päästötiedot osana ilmanvaihtokonetta (taulukko 17). LTO-laitteistolta lämpöpumpulle asennettavalle lämmönsiirtoputkistolle käytetään luvussa 5.2.2 *Aurinkolämpöjärjestelmän hiilijalanjälki* käsiteltyjä kansallisen päästötietokannan kasvihuonekaasupäästötietoja.

Taulukko 17. Päästötiedot ilmanvaihtokoneelle lämmöntalteenottoyksiköllä (CO2data 2023h).

<b>Järjestelmäosa</b>	<b>A1-A3</b> kgCO <sub>2</sub> e/kpl	<b>C3</b> kgCO <sub>2</sub> e/kpl	<b>D1</b> kgCO <sub>2</sub> e/kpl
IV-kone LTO-yksiköllä	2003,4	0,954	-725,04

## 6 Elinkaarivertailu

Hiilijalanjäljen elinkaarivertailu toteutetaan Microsoft Excel -muotoisena laskurina, joka toimii osana AFRY Buildings Finland Oy:lle kehitetyn energijärjestelmien elinkaarikustannuslaskuria. Elinkaarilaskurin käyttöä esitellään hypoteettisen case-esimerkin avulla tässä työssä määriteltävillä lähtöarvojen avulla.

### 6.1 Vertailulaskuri

Hiilijalanjäljen vertailulaskuri toteutetaan Microsoft Excel -pohjaisesti ja liitetään osaksi olemassa olevaa elinkaarikustannuslaskuria. Hiilijalanjälkilaskuria varten luodaan omat välilehdet laskurin käyttöohjeille, kerätyille päästökertoimille, tuloksille. Eri järjestelmävaihtoehtojen omille laskentavälilehdille koostetaan päästökeroaintietojen pohjalta elinkaaren hiilijalanjälkitaulukko, joka huomioi järjestelmän päästöt vuosittain eri elinkaaren vaiheet eritellen.

Yhdistämällä hiilijalanjälkilaskuri olemassa olevaan elinkaarikustannuslaskuriin vältytään samojen lähtötietojen syöttämiseltä kahdesti kahteen eri paikkaan. Näin vältytään ylimääräiseltä työltä ja minimoidaan riskit näppäilyvirheisiin arvojen syötössä. Esimerkiksi lämpöpumppujärjestelmien sähkönkulutuksen laskemisessa käytettävä SPF-arvo sen avulla laskettu energiakulutus ovat jo osana elinkaarikustannuslaskurin toiminnallisuutta, joten hiilijalanjälkilaskennassa hyödynnetään näitä valmiiksi syötettyjä ja laskettuja arvoja. Microsoft Excel tarjoaa myös mahdollisuuden linkittää laskukaavoihin arvoja eri tiedostojen välillä. Tällöin kuitenkin syntyy suurempi riski, että laskureita muokattaessa ja työkalun ollessa usean eri käyttäjän käytössä laskureiden linkitys katkeaa ja laskureiden yhteistoiminta pettää.

Laskurin GHG-päästökertoimina käytetään tässä työssä esiteltyjä arvoja. Lähtökohtaisina arvoina käytetään Suomen ympäristökeskuksen ylläpitämän kansallisen päästötietokannan päästötietoja. Toissijaisena päästötietolähteenä käytetään ympäristöministeriön (2019) laatiman rakennuksen vähähiilisyden

arviointimenetelmän ensimmäistä versiota ja siinä esiteltyjä päästöjen taulukkoarvoja. Päästötietokannasta ja rakennuksen vähähiilisyden arviointimenetelmästä puuttuvia tietoja täydennetään ympäristöselosteista ja muista tutkimustuloksista kerättyjen päästötietojen avulla. Päästötietoina pyritään käyttämään mahdollisimman keskiarvoisia arvoja laskurin yleisluonteisuus huomioiden.

Elinkaaren vaiheiden A4 ja C2 kuljetusmatkoina pyritään käyttämään keskiarvoisia kuljetusmatkoja Suomen olosuhteissa. Kuljetusten laskentamenetelmänä käytetään ympäristöministeriön (2021, 24) laatimaa kaavaa.

$$\begin{aligned} & \text{Kuljetuksen hiilijalanjälki} \\ & = [Kuorma_{meno} * Etäisyys_{meno} * GWP_{tkm,meno}] \\ & + [Kuorma_{paluu} * Etäisyys_{paluu} * GWP_{tkm,paluu}] \end{aligned}$$

jossa

*Kuorma* = kuorman paino tonneina (t)

*Etäisyys* = reitin pituus kilometreinä (km)

*GWP<sub>tkm</sub>* = kansallisessa päästötietokannassa määritelty kasvihuonekaasupäästö, joka syntyy tonnikipometriä kohden (kg CO<sub>2</sub>e/tkm)

Käytettävät kuljetusmatkat ja kuorman täyttöasteet ovat määriteltynä alaotsikon *Oletukset ja rajoitukset* alla luvussa 3.3.2 *Soveltamisala*. Kuljetuksissa käytetään lähtökohtaisena oletuksena, että kuljetuksista 75 prosenttia ajetaan maantieajona ja loput 25 prosenttia katuajona ja kuljetusmuotona toimii suuri jakelukuorma-auto. Näitä arvoja voidaan kuitenkin laskuria käytettäessä muokata tarpeiden mukaan.

Eri energijärjestelmien elinkaaritiedot koostetaan yhteenvetovälilehdelle, jonka avulla voidaan nopeasti koostaa asiakkaalle toimitettava tieto vertailtavista järjestelmistä. Yhteenvetovälilehdelle koostetaan myös valikoima valmiita



kuvaajia, joista halutut voidaan siirtää osaksi asiakkaalle toimitettavaa yhteenvetoa.

## 6.2 Case-esimerkki

### 6.2.1 Kohde

Hiilijalanjälkilaskurin toimintaa havainnollistetaan tässä työssä case-esimerkin kautta. Case-esimerkiksi laaditaan tätä työtä varten hypoteettinen kohde. Kohteen lähtötiedot koostetaan käyttäen AFRY Monitor -palvelusta saatuja kaukolämmön, sähkön sekä veden kulutustietoja. AFRY Monitor on sovellus, joka on tarkoitettu kiinteistöjen ylläpito-organisaation osapuolten käyttöön. Palveluun asiakaskohtaisesti räätälöitäviin ominaisuuksiin kuuluu muun muassa kulutusten etäseuranta. Sovelluksesta kerättyjen kulutustietojen pohjalta rakennetaan keskivertaiset kulutusprofiilit kaukolämmölle, ostosähkölle ja veden kulutukselle.

Sovelluksesta kerätyt kiinteistötiedot rajataan siten, että mukaan valitaan Turussa sijaitsevat asuinkerrostalot, joiden lämmitysmuotona on kaukolämpö ja ilmanvaihto tapahtuu keskitetysti. Keskiarvon laskennan ulkopuolelle jätetään ne kohteet, joiden lämmön, sähkön tai veden kulutustiedot ovat joltain osin puutteelliset vuosien 2019–2022 välillä. Näillä rajauksilla keskiarvokulutusten laskentaa voidaan tehdä 16 asuinkerrostalokiinteistön tietojen pohjalta. Keskiarvo- ja mediaanikulutukset ilmaistaan rakennustilavuuteen nähden kuutiota kohden (taulukko 18). Tarkemmat kuukausikohtaiset keskiarvo- ja mediaanikulutukset rakennustilavuuteen suhteutettuna ovat taulukoituna liitteessä 3.

Taulukko 18. Asuinkerrostalojen keskiarvoinen energia- ja vedenkulutus.

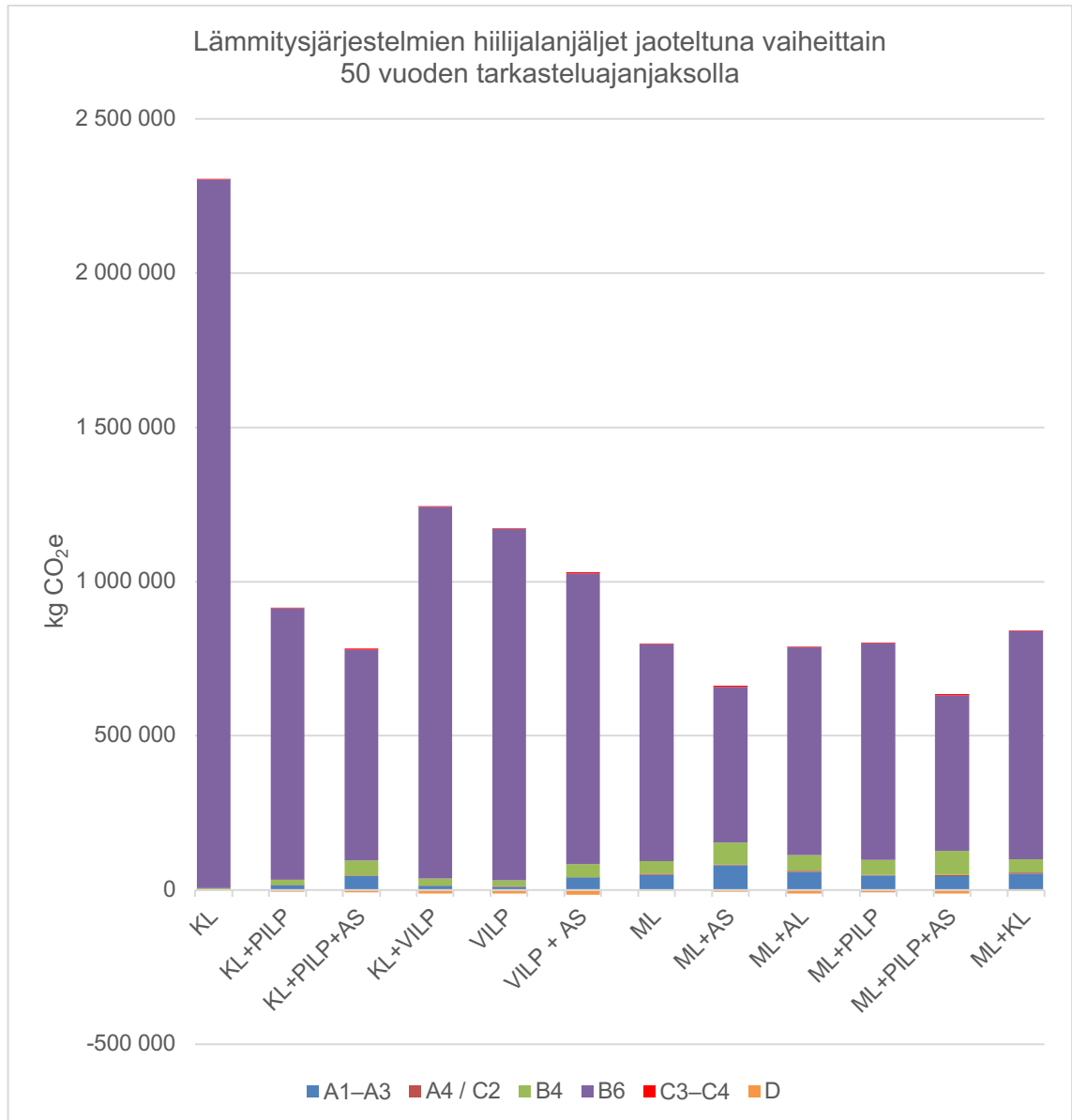
Keskiarvoiset kulutukset	Keskiarvo (2019–2022)	Mediaani (2019–2022)
Kaukolämpö, kWh/m <sup>3</sup> /vuosi	30,8	29,9
Sähkö, kWh/m <sup>3</sup> /vuosi	11,2	11,9
Vesi, dm <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> /vuosi	309,1	311,1

Case-esimerkin kiinteistön rakennustilavuudeksi päätetään 15 564 m<sup>3</sup> kulutustarkastelussa olleiden kiinteistöjen keskitilavuuden mukaisesti. Rakennuksen huonekorkeudeksi päätetään 2,7 metriä, jonka perusteella voidaan rakennuksen kokonaispinta-alaksi määritellä 5 764 m<sup>2</sup>. Koska lämpimän veden kulutus ei ole case-esimerkin tapauksessa tiedossa, se voidaan olettaa olevan 40 prosenttia veden kokonaiskulutuksesta (Motiva 2023d). Laskurin elinkaarikustannusominaisuuksia varten kaukolämmön ja ostosähkön hintatiedot haetaan Turku Energian verkkosivuilta.

### 6.2.2 Tulokset

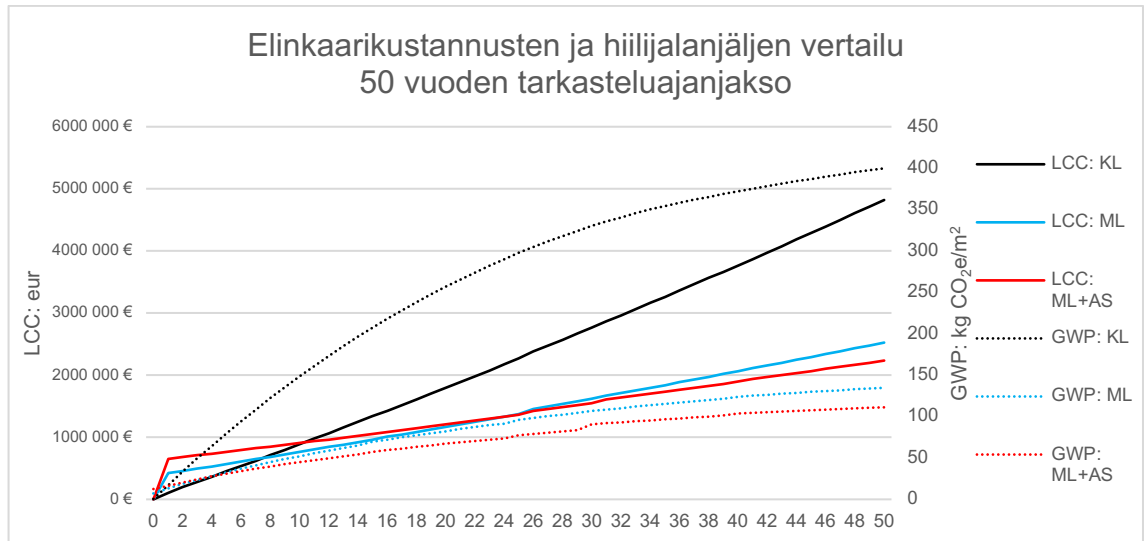
Case-esimerkiksi valitun kuvitteellisen kiinteistön hiilijalanjälkitarkastelun perusteella voidaan todeta, että järjestelmästä riippumatta valtaosa lämmitysjärjestelmien hiilijalanjäljestä syntyy käyttövaiheen ostoenergian käytöstä. Kuvio 11 kuvaa pylväsdiagrammin muodossa järjestelmien hiilijalanjälkiä 50 vuoden tarkastelujakson aikana. Elinkaaren vaiheet ovat eriteltynä pylväissä moduuleittain. Pelkkään kaukolämpöön pohjautuvan järjestelmän hiilijalanjälki erottuu muista järjestelmistä sen hiilijalanjäljen ollessa laskelmien mukaan jopa 2 300 t CO<sub>2</sub>e 50 vuoden tarkasteluajanjakson aikana.

Tulosten perusteella voidaan huomata, että aurinkosähkön lisääminen osaksi järjestelmää kasvattaa moduulien A1–A3 sekä B3–B4 päästöjä, mutta samaan aikaan laskee käyttövaiheen energiakulutuksen päästöjä moduulissa B6. Myös maalämmön kohdalla vaikutus on saman kaltainen. Aurinkolämpöjärjestelmällä käyttövaiheen B6 energiakulutuksen päästöjä voidaan tulosten perusteella vähentää hieman, mutta elinkaaren muiden moduulien päästöjen kasvaessa vaikutus kokonaispäästöihin on pieni. Tulosten perusteella poistoilmajärjestelmän liittäminen tuo suuremmat päästövähennykset kaukolämpöpohjaisissa järjestelmissä kuin maalämpöön perustuvissa järjestelmissä. (Kuvio 11.)



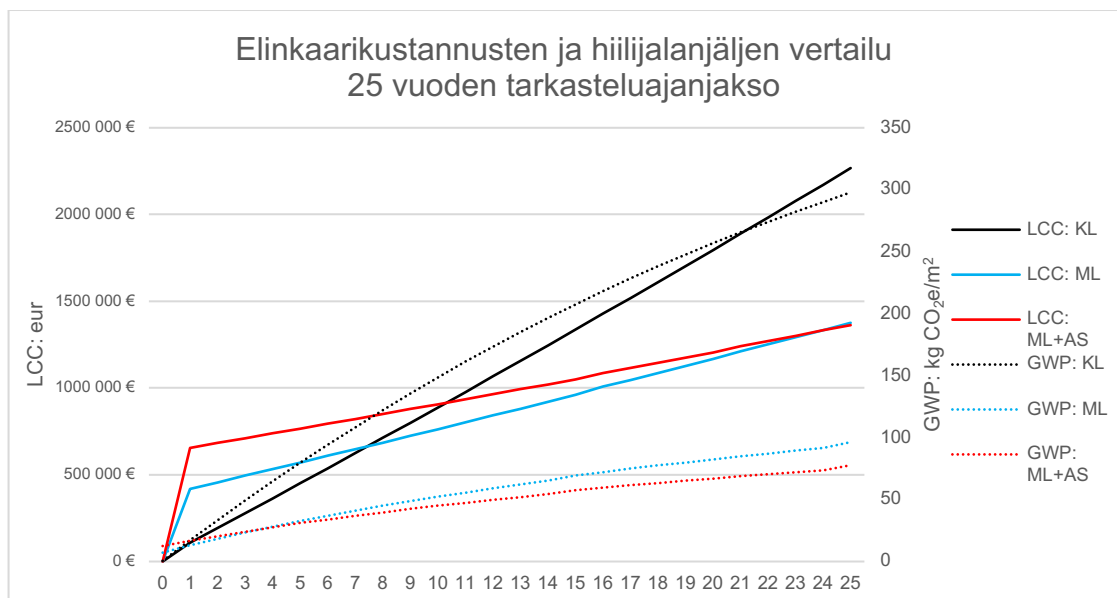
Kuvio 11. Lämmitysjärjestelmien hiilijalanjäljet jaoteltuna vaiheittain 50 vuoden tarkasteluajanjaksolla.

Tuloksista voidaan myös eritellä kaavio, joka esittää vertailuun valittujen järjestelmien elinkaarikustannusten ja hiilijalanjäljen suhdetta viivadiagrammin avulla (kuvio 12). Tämän kuvaajan perusteella voidaan huomata päästöjen kasvun hidastuvan järjestelmästä riippumatta, mitä pidemmälle tarkasteluajanjaksolla edetään. Tämä johtuu ostoenergian tuotannon kasvihuonekaasupäästöjen kehitysskenaariosta, jossa tuotannon kasvihuonekaasupäästöt laskevat ajan myötä.



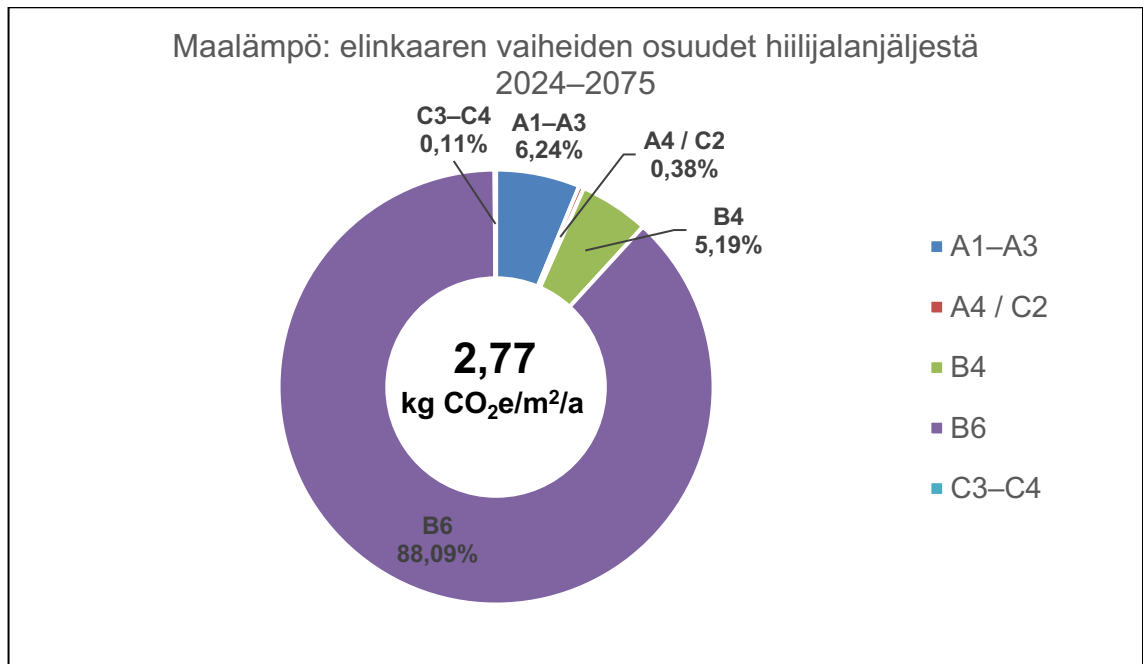
Kuvio 12. Elinkaarikustannusten ja hiilijalanjäljen vertailu 50 vuoden tarkasteluajanjaksolla.

Tuloksista voidaan myös esittää vastaava kaavio 25 vuoden tarkasteluajanjaksolta, jolloin voidaan paremmin tarkastella järjestelmien takaisinmaksuaikaa, kun syntyviä kuluja verrataan pelkän kaukolämmön varassa olevaan järjestelmään (kuvio 13). Laskurissa energian hinnan kasvulle voidaan syöttää kerroin, joka huomioi energian hinnan kasvun vuosittain.

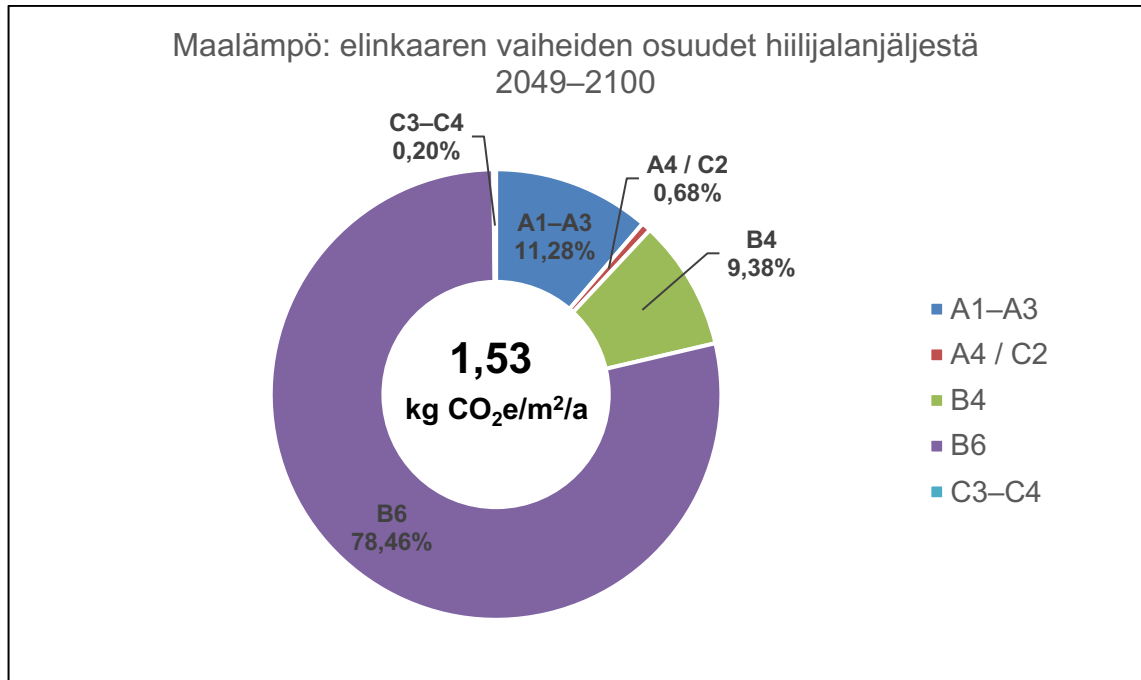


Kuvio 13. Elinkaarikustannusten ja hiilijalanjäljen vertailu 25 vuoden tarkasteluajanjaksolla.

Koska päästökehitysskenaarioiden perusteella ostoenergian tuotannon kasvihuonekaasupäästöt laskevat tulevaisuudessa, voidaan vertailuksi simuloida vaihtoehtoinen skenaario, jossa elinkaaren alkua siirretään 25 vuodella eteenpäin. Kun käyttövaiheen B6 päästöt laskevat, muun elinkaaren vaiheiden merkitys kasvaa päästöjä tarkasteltaessa. Kahden skenaarion vertailulla voidaan huomata, että esimerkiksi maalämpöjärjestelmän kohdalla moduulin B6 ulkopuoliset vaiheet kasvattavat osuuttaan 11,91 prosentista 21,54 prosenttiin vaiheen B6 päästöjen laskiessa. (Kuviot 14 ja 15.)



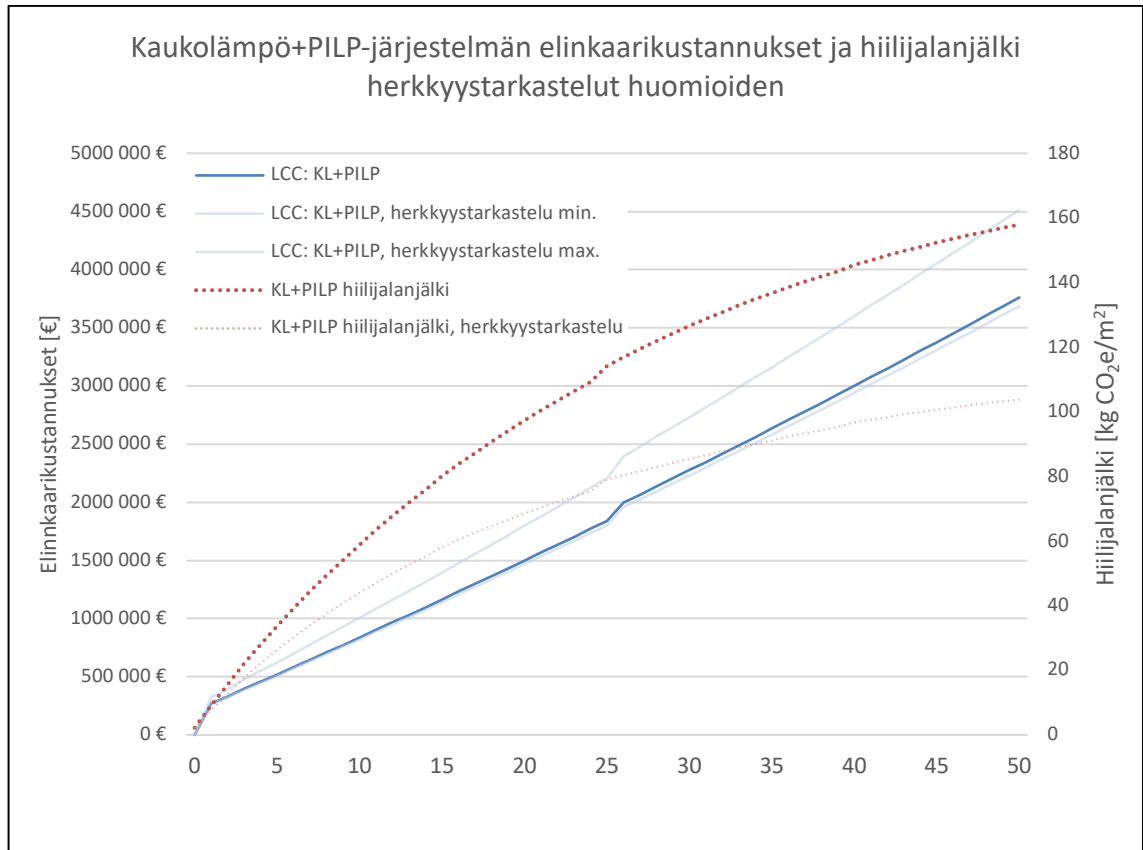
Kuvio 14. Maalämmön elinkaaren vaiheiden osuudet hiilijalanjäljestä vuosien 2024–2075 välillä.



Kuvio 15. Maalämmön elinkaaren vaiheiden osuudet hiilijalanjäljestä vuosien 2049–2100 välillä.

Skenaarioissa ei kuitenkaan ole huomioitu ympäristöministeriön (2021) menetelmän mukaisesti järjestelmäosien tuotannon mahdollisesti laskevia päästöjä. Todellisuudessa tuotevaiheen, kuljetusten ja elinkaaren lopun prosessien kehittyessä ja niiden energiakäytön kasvihuonekaasupäästöjen laskiessa voitaisiin olettaa myös näissä elinkaaren vaiheissa tapahtuvan kasvihuonekaasupäästöjen laskua.

Tuloksista voidaan kaavioiden avulla tarkastella myös herkkyystarkastelujen vaikutuksia järjestelmien elinkaarikustannuksiin ja hiilijalanjälkeen (kuvio 16). Hiilijalanjäljen herkkyystarkastelussa käytettiin ympäristöministeriön (2019, 46) rakentamisen vähähiilisyyden arviointimenetelmän ensimmäisessä versiossa esiteltyjä arvioita kaukolämmön ja ostosähkön tuotannon päästökehitykselle. Energiahinnan kehityksen herkkyystarkastelussa tukeuduttiin arvioihin, joita käsiteltiin luvussa *2.4 Kehityskulut sähkön ja kaukolämmön tuotannossa*.



Kuvio 16. Poistoilmalämpöpumpulla tuetun kaukolämmityksen elinkaarikustannukset ja hiilijalanjälki herkkyytarkasteluihin verraten.

## 7 Loppupohdinta

### 7.1 Katsaus tuloksiin

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli selvittää ja vertailla asumisen erilaisten energiajärjestelmien hiilijalanjälkeä huomioiden niiden koko elinkaaren aikana syntyneet kasvihuonekaasupäästöt. Hiilijalanjälkilaskurilla tuotetun case-esimerkkitapauksen tarkastelun kautta voidaan huomata, että valtaosa elinkaaren hiilijalanjälkikustannuksista muodostuu käyttövaiheen energiakulutuksen kautta. Tämän perusteella voitaisiin helposti päätellä ostoenergiatarpeen vähenemisen pohjalta tehdyn hiilijalanjälkivertailun toimivan karkeana pintapuolisena vertailuna järjestelmien välillä. Tämänkaltainen tarkastelu ei kuitenkaan kerro koko totuutta järjestelmien välisistä eroista ja joissain tapauksissa saattaa jopa antaa vääristyneen kuvan todellisista vaikutuksista. Tulosten perusteella esimerkiksi aurinkolämpöjärjestelmä maalämpöjärjestelmän osana vähentää moduulin B6 hiilijalanjälkeä samaan aikaan nostaen elinkaaren muiden vaiheiden merkitystä. Lopputuloksena kokonaishiilijalanjälki säilyy lähes samana pelkkään maalämpöön verrattuna.

Tulevaisuudessa pelkkään ostoenergian kulutukseen perustuva hiilijalanjälkivertailu vääristää todellisia tuloksia entisestään. Energian tuotannon kasvihuonekaasupäästöjen laskiessa käyttövaiheen B6 hiilijalanjäljen merkitys kokonaisuuden kannalta laskee. Tämän seurauksena tulevaisuuden järjestelmiä tarkasteltaessa koko elinkaaren päästöjen tarkastelu nousee yhä suurempaan rooliin.

Päästökehityskulut huomioiden kaukolämmön piirissä pysyttäytyminen saattaa tietyissä tilanteissa olla jopa kannattavampi ratkaisu hiilijalanjäljen kannalta. Jos oma paikallinen lämmöntuottaja siirtyy fossiilittomaan vähähiiliseen lämmöntuotantoon, voi kaukolämmitteinen järjestelmä olla ekologisempi ratkaisu kuin lämpöpumpuin toimiva ratkaisu. Kaukolämpöverkot ovat paikallisia kokonaisuuksia, jolloin yksittäisen lämmönmyyjän vähähiilinen tuotanto näyttäytyy konkreettisenä päästövähennyksenä asiakkaalle toisin kuin luvussa



4.2. *Ostosähkö* käsitellyt ekosähkö sopimukset, joiden päästövähennykset eivät vaikuta suoraan kiinteistön käytössä olevan sähkön hiilijalanjälkeen. Toisaalta on syytä muistaa kiinnittää huomiota mahdollisiin hiilijalanjäljen laskentaperiaatteiden muutoksiin, jolloin esimerkiksi biopolttoaineisiin siirtynyt kaukolämmön tuotanto ei välttämättä enää täytä samoja vähähiilisyyden kriteereitä.

Luvussa 2.4. *Kehityskulut sähkön ja kaukolämmön tuotannossa* käsiteltiin sähkön hintakehitykselle tehtyjä ennusteita. Pessimistisempien ennusteiden mukaan sähkön keskimääräinen hintataso voi nousta jopa 86 prosenttia huomiomatta kulutusjoustojen vaikutuksia (Roques et al 2021, 20–21). Tällaisten kehityskulkujen toteutuessa lämpöpumppujärjestelmien kannattavuus myös taloudellisessa mielessä saattaa laskea, jos kaukolämmön tuotanto välttyy samankaltaiselta hintapaineelta kuin sähköntuotanto.

Vaikka elinkaaritarkastelu oletettujen tulevaisuusskenaarioiden pohjalta sisältää aina epävarmuuksia, on erityisesti huomioitava, että tässä työssä kehitetty laskuri perustuu karkeisiin keskiarvoisiin oletuksiin järjestelmän ja sen osien hiilijalanjäljistä. Tämä huomioiden on muistettava, että laskuri on toimiva työkalu vain hankesuunnitelmavaiheessa tehtävään pintapuoliseen kasvihuonekaasupäästövertailuun. Käytännössä toteutettavalle hankkeelle voidaan laskea tarkempi hiilijalanjälki vasta, kun tiedetään järjestelmän tarkemmat yksityiskohdat laite- ja materiaaliluetteloineen ja mitoituksineen.

Puutteet asianmukaisessa julkisessa hiilijalanjälkitiedossa muodostuivat paikoin haasteeksi työn edetessä. Vaikka esimerkiksi ilmastaselvitysten pohjana käytettävää tietoa keräävä kansallinen päästötietokanta sisältää laajalti keskiarvoista päästötietoa rakentamisen tarkasteluun, tietokannan sisältö varsinkin talotekniikan tuotteiden kannalta on paikoin vielä puutteellinen. Tästä syystä esimerkiksi maalämmön osalta jouduttiin osin turvautumaan vastaavan kaltaisen saksalaisen tietokannan päästötietoihin. Tässä tutkimuksessa ei kuitenkaan syvemmin perehdytty siihen, miten hyvin esimerkiksi maalämpökaivojen poraus Saksassa vertautuu Suomeen. Muun muassa maaperän eroavaisuudet sekä maiden erilaiset rakennusmääräykset ja

käytänteet saattavat vaikuttaa kaivojen poraamisen ja lämmönkeruuverkoston asentamisen hiilijalanjälkeen.

Kun huomioidaan esimerkiksi lainsäädännölliset ohjauskeinot ympäristövaikutustenselvityksien lisäämiseksi, voidaan olettaa käytettävissä olevan hiilijalanjälkitiedon määrän lisääntyvän lähitulevaisuudessa. Tiedon määrän kasvaessa tämän työn kaltaisen keskiarvoisiin geneerisiin päästötietoihin pohjautuvan tutkimuksen lähtökohdat ja mahdollisuudet parantuvat entisestään. Jatkotutkimuksena olisi mielenkiintoista ja laajemmassa mittakaavassa jopa tarpeellista tehdä myös Suomen oloissa elinkaariarviointia maalämpö-järjestelmien ympäristövaikutuksista. Saatua tietoa voitaisi lisätä myös osaksi kansallista päästötietokantaa.

Nykyisten laskentasääntöjen mukaisesti hiilijalanjälki ja hiilikädenjälki tulee laskea ja ilmoittaa erikseen vähentämättä hiilikädenjäljen vaikutuksia hiilijalanjäljestä. Järjestelmien kokonaisilmastovaikutuksia vertailtaessa ja niistä viestittäessä on kuitenkin hyvä muistaa pitää selkeästi esillä myös hiilikädenjäljen vaikutus energiaratkaisujen kannalta. Esimerkiksi nykyisten kiinteistökohtaisten aurinkosähköjärjestelmien ylijäämätuotantoa voidaan myydä niin yksittäisten omistajien kuin energiayhteisöjenkin toimesta sähköverkkoon. Tällöin pelkän hiilijalanjäljen tarkastelu järjestelmien kokonaisilmastovaikutusten kannalta on epäreilua suuremman hiilikädenjäljen järjestelmien näkökulmasta.

## 7.2 Jatkotutkimus- ja kehityskohteita

Laskurilla on olemassa monia jatkokehitys- ja laajennusmahdollisuuksia. Esimerkiksi kiinteistöjen viillennys- ja jäähdytysjärjestelmien lisääminen osaksi laskentatyökalun toiminnallisuutta lisääisivät energiankulutuksen kokonaistarkastelun luotettavuutta. Ilmastomuutoksen myötä kiinteistöjen viillennystarpeet tulevat lisääntymään myös Suomessa. Viillennyksen tarkastelun lisääminen osaksi laskuria auttaisi myös vastaamaan Level(s)-järjestelmän viidenteen makrotavoitteeseen *ilmastonmuutokseen sopeutuminen*. Ilmastomuutoksen hillintään pyrkiminen on tärkeää, mutta sen tuomiin

muutokseen on kuitenkin pyrittävä myös sopeutumaan, mikä tarkoittaa muun muassa parempaa varautumista kuumuuteen. Monissa lämpöpumppujärjestelmissä on mahdollisuus viilennysominaisuuksiin, jolloin viilennys tapahtuu saman jo entuudestaan tarkastelun alla olevan laitteiston kautta. Tällä lisäyksellä laskentatyökalu kykenisi antamaan kokonaisvaltaisempaa tietoa asumisen koko vuoden energiakäytöstä.

Myös erilaisten energiavarastojen, kuten akkujärjestelmien lisääminen osaksi laskuria kasvattaisi työkalun ominaisuuksia kohti tulevaisuuden älykkäitä energijärjestelmiä. Energiavarastojen avulla voidaan tasata esimerkiksi aurinkoenergian epätasaista tuotantoa kattamaan laajemmin energian kysynnän ja tarjonnan vaihtelun muodostamia haasteita. Näin esimerkiksi päivällä tuotettua ylimääräistä sähköenergiaa voidaan hyödyntää laajemmin suoraan kiinteistön omassa käytössä. Enenevässä määrin uusiutuviin energiatuotantomuotoihin perustuvat tulevaisuuden energijärjestelmät tarvitsevat osakseen sekä energiavarastoja että kokonaisvaltaisesti älykkäitä energijärjestelmiä, jolloin näiden tarkastelu osana kiinteistön energiaratkaisujen elinkaarikustannus- ja hiilijalanjälkiarvioita olisi perusteltua.

Energiavarastojen lisääminen osaksi tarkastelua toisaalta kasvattaa runsaasti laskennassa tarvittavia tietoja sekä muuttujien määrää. Energiavarastointiin on jo nykyisin olemassa erilaisiin mekanismeihin, materiaaleihin ja valmistustapoihin pohjautuvia ratkaisuja. Pelkästään erilaisiin akkukemioihin perustuvia ratkaisuja on olemassa useita, ja tulevaisuudessa esimerkiksi suola-akut saattavat toimia kustannus- ja raaka-ainetehokkaana vaihtoehtona nimenomaan energiavarastojen osalta.

Energiavarastojen onnistunut integraatio osaksi laskentatyökalun toiminnallisuutta vaatii saataville myös entistä tarkempia energiakulutustietoja esimerkiksi eri vuorokaudenaikoina tapahtuvan energiakulutuksen vaihtelun vuoksi. Useissa kohteissa kerätään tuntikohtaista kulutustietoa niin sähkön, lämmön kuin vedenkin kulutuksen osalta, minkä myötä tarkempaa kulutustietoa olisi usein saatavilla. Esimerkiksi tämän työn case-esimerkiksi laadittuun kohteeseen hyödynnettiin AFRY Monitor -palvelua, jonka asiakaskohtaisesti

räätälöitävään toiminnallisuuteen voidaan liittää reaaliaikainen kulutuksen seuranta. Aina kuitenkin tarkkaa kulutustietoa ei ole saatavilla. Tällaisia tapauksia ovat esimerkiksi uudiskohteet. Näiden kohteiden tarkastelua varten olisi laskuria varten hyvä kerryttää erilaisia valmiita keskiarvoisia kulutusprofiileja, joita voidaan tällaisissa tapauksissa hyödyntää.

Toistaiseksi laskuri keskittyy erilaisten lämpöpumppu- ja aurinkoenergiajärjestelmien vertailuun suhteessa kaukolämpöön ja ostosähköön. Lisämarkkinoita laskurin käytölle mietittäessä voidaan pohtia, tulisiko biopohjaisten ja fossiilisten polttoaineiden polttoon perustuvien energijärjestelmien lisääminen osaksi laskentaa laskurin potentiaalisia käyttökohteita. Etenkin fossiilisten polttoaineiden osalta asiakasta voitaisiin kannustaa työkalun antamien kustannus- ja hiilijalanjälkitietojen perusteella luopumaan epäekologisesta lämmitysjärjestelmästä. Tilastokeskuksen (2022) mukaan öljylämmityksen osuus on laskussa ja öljylämmitteisten asuntojen osuus oli vuonna 2022 enää 5 prosenttia kaikista asunnoista. Omakotitalojen osalta lasku on ollut erityisen nopeaa, sillä vuosien 2016–2022 välillä öljylämmityksen osuus laski 16 prosentista 10 prosenttiin (Tilastokeskus 2022). Supistuvien markkinoiden perusteella voidaankin todeta, että öljylämmityksestä luopumiseen on olemassa jo runsaasti kannustimia ja potentiaaliset markkinat alkavat hävitä. Tämän perusteella öljylämmitykseen pohjaavan vaihtoehdon lisääminen laskuriin ei välttämättä lisää merkittävästi markkinoita laskurin käytölle.

Biopohjaisten polttoaineiden hiilijalanjälkilaskennan lisäämisellä työkaluun on tulevaisuusnäkökulman kannalta omat erityispiirteensä. Vaikka nykyään biopolttoaineita pidetään laskennallisesti lähes nollapäästöisinä biomateriaalin sitoessa kasvaessaan hiiltä ilmakehästä, voi laskentaperiaatteiden muutokset tulevaisuudessa muuttaa biopolttoaineiden laskennallisia päästöjä.

Yhteiskunnan liiallinen turvautuminen biopolttoaineiden polttoon energiantuotannossa on ongelmallista niin hiilinielujen kuin maankäyttöisten ongelmienkin vuoksi. Ilmastonmuutoksen myötä vähenevää viljelykelpoista maa-alaa olisi ruuantuotannon turvaamiseksi järkevämpi käyttää ruuan viljelyyn

biopolttoaineiden tuottamisen sijasta. Myös metsien kaataminen biopolttoainetarkoituksessa ei ole pitkällä tähtäimellä kestävää hiilinielujen ja luonnonmonimuotoisuuden vähentyessä. Toisaalta hiilijalanjälkilaskenta pitää sisällään runsaasti muitakin epävarmuustekijöitä, jolloin liiallinen spekulointi laskentaperiaatteiden mahdollisista muutoksista laskennan esteenä voidaan nähdä ongelmallisena.

Laskurin toiminnallisuutta laajennettaessa voitaisi harkita myös muiden elinkaariarvioinnin ympäristövaikutusluokkien lisäämistä osaksi tarkastelua. Esimerkiksi vesijalanjäljen tarkastelu ja luonnonvarojen käytön huomioiminen osana laskuria antaisi asiakkaalle laajemman kuvan vaihtoehtojen vaikutuksista. Elinkaariarvioinnissa yleisesti ottaen kannustetaan tarkastelemaan vaikutuksia useamman ympäristövaikutusluokan kautta, jotta voidaan välttää se, että tehtävät ratkaisut siirtävät ongelmakohtia vaikutusluokasta toiseen. Sopivalla toiminnallisuuden lisäyksellä voitaisiin asiakasta kannustaa kiertotaloutta edistäviin ja helpottaviin ratkaisuihin ja näin vähentää hankkeiden luonnonvarojen käyttöä ja ympäristövaikutuksia laajemmassa mittakaavassa.

Jos laskentatyökalun ominaisuuksia ja sisältöä lähdetään laajentamaan runsaasti, voi jossain vaiheessa olla perusteltua siirtää laskurin toiminnallisuus osaksi laajempia tietokokonaisuuksia Microsoft Exceliä paremmin käsitteleviin sovelluksiin, kuten Microsoft Power BI. Excelin käyttöä puoltaa kuitenkin sen laajalle levinnyt käyttöaste ja ohjelmisto-osaaminen, mutta toisaalta hyvin laajojen tietomäärien käsittelyssä esimerkiksi edellä mainittu Power BI suoriutuu paremmin. Lisäksi Power BI:n avulla on mahdollista koostaa tietoa eri lähteistä, jolloin esimerkiksi edellä käsitelty kohteen kulutustietojen yhdistäminen kulutustietojärjestelmistä olisi käytännöllisempää.

## Lähteet

Auvinen, K. 2016. Aurinkolämpöjärjestelmien hintatasot ja kannattavuus. Viitattu 29.9.2023. <https://finsolar.net/kannattavuus/aurinkolampojarjestelmien-hintatasot-ja-kannattavuus-suomessa/>

Bonamente, E & Aquino, A. 2019. Environmental Performance of Innovative Ground-Source Heat Pumps with PCM Energy Storage. Energies. Life Cycle Assessment (LCA) of Environmental and Energy Systems. Basel, Sveitsi: MDPI. [https://mdpi-res.com/bookfiles/book/3563/Life\\_Cycle\\_Assessment\\_LCA\\_of\\_Environmental\\_and\\_Energy\\_Systems.pdf?v=1697722914](https://mdpi-res.com/bookfiles/book/3563/Life_Cycle_Assessment_LCA_of_Environmental_and_Energy_Systems.pdf?v=1697722914)

CO2data. 2023a. Rakentamisen päästötietokanta. Viitattu 1.11.2023. <https://co2data.fi/rakentaminen/>

CO2data. 2023b. Energy district heating. Viitattu 1.11.2023. [https://co2data.fi/rakentaminen/#fi\\_id7000000763](https://co2data.fi/rakentaminen/#fi_id7000000763)

CO2data. 2023c. Vesipumppu. Viitattu 15.11.2023. [https://co2data.fi/rakentaminen/#fi\\_id7000000435](https://co2data.fi/rakentaminen/#fi_id7000000435)

CO2data. 2023d. Energy, electricity consumption. Viitattu 1.11.2023. [https://co2data.fi/rakentaminen/#fi\\_id7000000778](https://co2data.fi/rakentaminen/#fi_id7000000778)

CO2data. 2023e. Solar panel, monocrystalline. Viitattu 1.11.2023. [https://co2data.fi/rakentaminen/#fi\\_id7000000483](https://co2data.fi/rakentaminen/#fi_id7000000483)

CO2data. 2023f. Solar thermal collector, flat plate. Viitattu 1.11.2023. [https://co2data.fi/rakentaminen/#fi\\_id7000000487](https://co2data.fi/rakentaminen/#fi_id7000000487)

CO2data. 2023g. Heat pump, air to air. Viitattu 1.11.2023. [https://co2data.fi/rakentaminen/#fi\\_id7000000442](https://co2data.fi/rakentaminen/#fi_id7000000442)

CO2data. 2023h. Air exchanger with heat recovery. Viitattu 20.11.2023. [https://co2data.fi/rakentaminen/#fi\\_id7000000426](https://co2data.fi/rakentaminen/#fi_id7000000426)

Danfoss Climate Solutions. 2023. Environmental Product Declaration. Turbocor® compressor TTH375. Viitattu 10.11.2023. <https://assets.danfoss.com/documents/256423/BI451950884201en-000102.pdf>

Direktiivi 2018/2001/EU. Euroopan parlamentin direktiivi uusiutuvista lähteistä peräisin olevan energian käytön edistämiseksi (uudelleenlaadittu). Euroopan unionin virallinen lehti 21.12.2018. Viitattu 10.11.2023. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/?uri=celex%3A32018L2001>

Dodd, N.; Espinosa, N; Van Tichelen, P & Peeters, K. 2018. Preparatory study for solar photovoltaic modules, inverters and systems. Draft Report Task 5: Environmental and economic assessment of base cases. JRC Technical Reports. Viitattu 19.10.2023. [https://susproc.jrc.ec.europa.eu/product-bureau/sites/default/files/contenttype/product\\_group\\_documents/1581689975/DraftReport\\_Task5.pdf](https://susproc.jrc.ec.europa.eu/product-bureau/sites/default/files/contenttype/product_group_documents/1581689975/DraftReport_Task5.pdf)

Dodd, N; Donatello, S & Cordella, M. 2021. Level(s) – A common EU framework of core sustainability indicators for office and residential buildings. User Manual 1: Introduction to the Level(s) common framework. Publication version 1.1. JRC Technical Reports. Viitattu 19.10.2023.

Energiateollisuus. 2019. Lämmön osto ja kaksisuuntainen lämpökauppa. Viitattu 25.10.2023.

[https://energia.fi/files/3817/Lammon\\_ostoa\\_ja\\_2suuntaista\\_kaupaa\\_koskeva\\_ohje\\_lopullinen\\_20190521.pdf](https://energia.fi/files/3817/Lammon_ostoa_ja_2suuntaista_kaupaa_koskeva_ohje_lopullinen_20190521.pdf)

Eskola, L.; Jokisalo, J. & Sirén, K. 2012. Lämpöpumppujen energialaskentaopas. Viitattu 29.9.2023.

[https://ym.fi/documents/1410903/38439968/Lampopumppujen-energiaskentaopas-3.10.2012-](https://ym.fi/documents/1410903/38439968/Lampopumppujen-energiaskentaopas-3.10.2012-10A732A6_EA2F_45F9_869C_6F909138CB26-30757.pdf/1d053cd5-1865-e174-6424-841fac831c48/Lampopumppujen-energiaskentaopas-3.10.2012-10A732A6_EA2F_45F9_869C_6F909138CB26-307)

[10A732A6\\_EA2F\\_45F9\\_869C\\_6F909138CB26-30757.pdf/1d053cd5-1865-e174-6424-841fac831c48/Lampopumppujen-energiaskentaopas-3.10.2012-10A732A6\\_EA2F\\_45F9\\_869C\\_6F909138CB26-307](https://ym.fi/documents/1410903/38439968/Lampopumppujen-energiaskentaopas-3.10.2012-10A732A6_EA2F_45F9_869C_6F909138CB26-307)

Euroopan parlamentti. 2021. EU:n ilmastolaki: parlamentti hyväksyi ilmastoneutraaliuden vuoteen 2050 mennessä. Lehdistötiedote. Viitattu 13.9.2023. <https://www.europarl.europa.eu/news/fi/press-room/20210621IPR06627/ilmastolaki-eu-parlamentti-hyvaksyi-ilmastoneutraaliuden-vuoteen-2050-mennessa>

Euroopan parlamentti. 2023. Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi rakennusten energiatehokkuudesta (uudelleenlaadittu). Viitattu 27.11.2023. [https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/TA-9-2023-0068\\_FI.html](https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/TA-9-2023-0068_FI.html)

Eurooppa-neuvosto. 2023a. Pariisin ilmastosopimus. Viitattu 2.10.2023.  
<https://www.consilium.europa.eu/fi/policies/climate-change/paris-agreement/#what>

Eurooppa-neuvosto. 2023b. 55-valmiuspaketti. Viitattu 13.9.2023.  
<https://www.consilium.europa.eu/fi/policies/green-deal/fit-for-55-the-eu-plan-for-a-green-transition/>

Eurooppa-neuvosto. 2023c. 55-valmiuspaketti: neuvosto sopuun tiukemmista rakennusten energiatehokkuussäännöistä. Lehdistötiedote 25.10.2022. Viitattu 13.9.2023. <https://www.consilium.europa.eu/fi/press/press-releases/2022/10/25/fit-for-55-council-agrees-on-stricter-rules-for-energy-performance-of-buildings/>

Fraunhofer ISE. 2021. European glass-glass photovoltaic modules are particularly climate-friendly. Lehdistötiedote 23.9.2021. Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE. Viitattu 20.9.2023.  
[https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/presseinformation/en/2021/2221\\_ISE\\_e\\_PR\\_CO2%20Footprint%20of%20PV%20modules.pdf](https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/presseinformation/en/2021/2221_ISE_e_PR_CO2%20Footprint%20of%20PV%20modules.pdf)

GHG Protocol. 2023. About GHG Protocol. Viitattu 11.10.2023.  
<https://ghgprotocol.org/about-us>

Global Footprint Network. 2023. Past earth overshoot days. Viitattu 13.9.2023.  
<https://www.overshootday.org/newsroom/past-earth-overshoot-days/>

Hakala, O. 2021. Aurinkopaneelin ja -paneelituotannon hiilijalanjälki – Tutkimustyö Salo Tech Oy:lle. Opinnäytetyö. Energia- ja ympäristötekniikan koulutus. Turku: Turun ammattikorkeakoulu. Viitattu 20.9.2023.  
[https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/512660/Hakala\\_Otto.pdf](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/512660/Hakala_Otto.pdf)

Harju, P. 2010. Lämmitystekniikan oppikirja. 4. painos. Kouvola: Penan Tieto-Opus Ky

HE 139/2022 vp. Hallituksen esitys eduskunnalle rakentamislainsiksi ja siihen liittyviksi laeiksi. Viitattu 2.11.2023.  
[https://www.eduskunta.fi/FI/vaski/HallituksenEsitys/Sivut/HE\\_139+2022.aspx](https://www.eduskunta.fi/FI/vaski/HallituksenEsitys/Sivut/HE_139+2022.aspx)



- Heimonen, I. 2011. Aurinko-opas 2012. Aurinkolämmön ja –sähkön energiantuoton laskennan opas. Viitattu 1.11.2023.  
[https://ym.fi/documents/1410903/38439968/Aurinko-Laskentaopas-2012\\_ver23082011-F4F73E83\\_56AF\\_4112\\_AD7B\\_0E1F1804D38B-30750.pdf/c6be6102-7bf6-17ae-17b0-d54c2cd99d83/Aurinko-Laskentaopas-2012\\_ver23082011-F4F73E83\\_56AF\\_4112\\_AD7B\\_0E1F1804D38B-30750.pdf?t=1603260207096](https://ym.fi/documents/1410903/38439968/Aurinko-Laskentaopas-2012_ver23082011-F4F73E83_56AF_4112_AD7B_0E1F1804D38B-30750.pdf/c6be6102-7bf6-17ae-17b0-d54c2cd99d83/Aurinko-Laskentaopas-2012_ver23082011-F4F73E83_56AF_4112_AD7B_0E1F1804D38B-30750.pdf?t=1603260207096)
- Hiilihelppi. n.d. Tuota aurinkokeräimellä lämmintä vettä. Viitattu 29.9.2023.  
<https://hiilihelppi.fi/uusiutuvat-energiamuodot/aurikokerain/>
- Huomo, E. 2022. Uusien LVI-järjestelmien käyttöiän määrittäminen. Opinnäytetyö. Talotekniikan tutkinto-ohjelma, LVI-talotekniikka. Tampere: Tampereen ammattikorkeakoulu. Viitattu 27.11.2023.  
<https://www.theseus.fi/handle/10024/751972>
- Häkkinen, T. & Kuittinen, M. 2020. Kohti vähähiilistä rakentamista. Opas arviointiin ja suunnitteluun. Helsinki: Rakennustieto Oy
- HögforsGST. n.d. GST Lämmönjakokeskus. Viitattu 20.11.2023.  
<https://productsheet.hogforsgst.com/fi/gst-lammonjakokeskus/?output=pdf>
- Ilmastolaki 423/2022. Annettu Helsingissä 10.6.2022. Saatavilla sähköisesti osoitteessa <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2022/20220423>
- IRENA. 2023. Renewable Power Generation Costs in 2022. International Renewable Energy Agency. Viitattu 17.10.2023 [https://mc-cd8320d4-36a1-40ac-83cc-3389-cdn-endpoint.azureedge.net/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2023/Aug/IRENA\\_Renewable\\_power\\_generation\\_costs\\_in\\_2022.pdf?rev=cccb713bf8294cc5bec3f870e1fa15c2](https://mc-cd8320d4-36a1-40ac-83cc-3389-cdn-endpoint.azureedge.net/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2023/Aug/IRENA_Renewable_power_generation_costs_in_2022.pdf?rev=cccb713bf8294cc5bec3f870e1fa15c2)
- Johnson, E. 2010. Air-source heat pump carbon footprints: HFC impacts and comparison to other heat sources. Energy Policy 39 / 2011. Viitattu 19.10.2023.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301421510008906>
- Kylili, A; Fokaides, P; Ionnides, A & Kalogirou, S. 2017. Environmental assessment of solar thermal systems for the industrial sector. Journal of Cleaner Production 176 (2018). Viitattu 23.11.2023.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652617331098>

Lund, P. 2022. Sähköistämisen vaikutuksia ja mahdollisuuksia Suomen energijärjestelmässä – skenaariotarkasteluja. Suomen ilmastopaneeli. Raportti 1/2022. Viitattu 2.10.2023. <https://www.ilmastopaneeli.fi/wp-content/uploads/2022/03/ilmastopaneelin-raportti-1-2022-sahkoistamisen-vaikutuksia-ja-mahdollisuuksia-suomen-energiajarjestelmassa-skenaariotarkasteluja.pdf>

Menzies, G.F. & Roderick, Y. Energy and carbon impact analysis of a solar thermal collector system. International Journal of Sustainable Engineering. Viitattu 29.9.2023.

[https://www.researchgate.net/publication/233130486\\_Energy\\_and\\_carbon\\_impact\\_analysis\\_of\\_a\\_solar\\_thermal\\_collector\\_system](https://www.researchgate.net/publication/233130486_Energy_and_carbon_impact_analysis_of_a_solar_thermal_collector_system)

Motiva. 2017. Säästöjen ja käyttötapojen vaikutus energiankulutukseen – Omakotitalot. Viitattu 29.9.2023.

[https://www.motiva.fi/files/16812/Saatojen\\_ja\\_kayttotapojen\\_vaikutus\\_energian\\_kulutukseen\\_-\\_Omakotitalot.pdf](https://www.motiva.fi/files/16812/Saatojen_ja_kayttotapojen_vaikutus_energian_kulutukseen_-_Omakotitalot.pdf)

Motiva. 2020a. Aurinkolämpöjärjestelmät. Viitattu 20.9.2023.

[https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva\\_energia/aurinkolampo/aurinkolampojar\\_jestelmat](https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkolampo/aurinkolampojar_jestelmat)

Motiva. 2020b. Aurinkolämpö. Ilmakeräimet. Viitattu 20.9.2023.

[https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva\\_energia/aurinkolampo/aurinkolampojar\\_jestelmat/ilmakeraimet](https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkolampo/aurinkolampojar_jestelmat/ilmakeraimet)

Motiva. 2020c. Aurinkolämpö. Järjestelmän muut osat. Viitattu 20.9.2023.

[https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva\\_energia/aurinkolampo/aurinkolampojar\\_jestelmat/jarjestelman\\_muut\\_osat](https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkolampo/aurinkolampojar_jestelmat/jarjestelman_muut_osat)

Motiva. 2020d. Aurinkolämpö. Hinnat ja kannattavuus. Viitattu 25.10.2023.

[https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva\\_energia/aurinkolampo/hankinta\\_ja\\_ennus/hinnat\\_ja\\_kannattavuus](https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkolampo/hankinta_ja_ennus/hinnat_ja_kannattavuus)

Motiva. 2022a. Kaukolämpö. Viitattu 13.9.2023.

[https://www.motiva.fi/koti\\_ja\\_asuminen/rakentaminen/lammitysjarjestelman\\_valinta/lammitysmuodot/kaukolampo](https://www.motiva.fi/koti_ja_asuminen/rakentaminen/lammitysjarjestelman_valinta/lammitysmuodot/kaukolampo)

Motiva. 2022b. Aurinkolämpö. Nestekiertoiset keräimet. Viitattu 20.9.2023.

[https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva\\_energia/aurinkolampo/aurinkolampojar\\_jestelmat/nestekiertoiset\\_keraimet](https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkolampo/aurinkolampojar_jestelmat/nestekiertoiset_keraimet)

Motiva. 2023a. Lämmönjakokeskuksen uusinta kannattaa tehdä suunnitelmallisesti. Viitattu 16.11.2023.

[https://www.motiva.fi/koti\\_ ja\\_ asuminen/ taloyhtiöt\\_ \\_ yhdessä\\_ energiatehokkaasti/ lammitys/ lammonjakokeskuksen\\_ uusinta\\_ kannattaa\\_ tehdä\\_ suunnitelmallisesti](https://www.motiva.fi/koti_ ja_ asuminen/ taloyhtiöt_ _ yhdessä_ energiatehokkaasti/ lammitys/ lammonjakokeskuksen_ uusinta_ kannattaa_ tehdä_ suunnitelmallisesti)

Motiva. 2023b. CO<sub>2</sub>-päästökertoimet. Viitattu 21.9.2023.

[https://www.motiva.fi/ratkaisut/ energiankaytto\\_ suomessa/ co2- paastokertoimet](https://www.motiva.fi/ratkaisut/ energiankaytto_ suomessa/ co2- paastokertoimet)

Motiva. 2023c. Kaukolämmön erillistuotannon paikkakuntien ryhmäjako ja laskennassa käytettävät ryhmäkohtaiset CO<sub>2</sub>-päästökertoimet (Päivitetty 16.5.2023). Viitattu 21.9.2023.

[https://www.motiva.fi/files/21310/ Erillistuotannon\\_ paikkakunnat\\_ \\_ keskiarvo\\_ 2019-2021. pdf](https://www.motiva.fi/files/21310/ Erillistuotannon_ paikkakunnat_ _ keskiarvo_ 2019-2021. pdf)

Motiva. 2023d. Kulutuksen normitus. Laskentakaavat ja -ohjeet. Viitattu 15.11.2023.

[https://www.motiva.fi/files/20935/ Motiva\\_ Kulutuksen normitus\\_ laskentakaavat- ja- ohjeet\\_ 01-2023. pdf](https://www.motiva.fi/files/20935/ Motiva_ Kulutuksen normitus_ laskentakaavat- ja- ohjeet_ 01-2023. pdf)

Niemi, L. 2023. Suomen sähköntuotannon päästöt putosivat lähelle nollaa.

Helsingin sanomat 13.10.2023. Viitattu 15.10.2023. <https://www.hs.fi/ talous/ art- 2000009921038. html>

Perälä, R. 2017. Aurinkosähköä. Helsinki: Alfamer / Karisto Oy

Polo, A. 2023. Iso ja positiivinen muutos on jo alkanut, mutta harva edes tietää siitä: Asumisemme hiilijalanjälki on suuressa laskussa. Yle Uutiset. 21.3.2023. Viitattu 5.9.2023. <https://yle.fi/ a/ 74- 20023387>

Rakennustieto Oy. 2008. Kiinteistön tekniset käyttöiät ja kunnossapitojaksot. RT 18-10922. Ohjekortti. <https://kortistot.rakennustieto.fi/ kortit/ RT% 2018- 10922>

Rakennustieto Oy. 2019. Verkkoon kytketyt aurinkosähköjärjestelmät. RT 103076. Ohjekortti. <https://kortistot.rakennustieto.fi/ resource/ juha/ content/ 24829>

Rakentamislaki 751/2023. Annettu Helsingissä 21.4.2023. Saatavilla sähköisesti osoitteessa <https://www.finlex.fi/ fi/ laki/ alkup/ 2023/ 20230751>

Roques, F; La Theis, Y; Aue, G; Spodniak, P; Pugliese, G; Cail, S; Peffen, A; Honkapuro, S & Sihvonen, V. 2021. Enabling cost-efficient electrification in

Finland. Sitra studies 194. <https://www.sitra.fi/app/uploads/2021/09/sitra-enabling-cost-efficient-electrification-in-finland.pdf>

Russo, G; Anifantis, A; Verdiani, G & Scarascia Mugnozza, G. 2014. Environmental analysis of geothermal heat pump and LPG greenhouse heating systems. *Biosystems Engineering* 127 (2014) 11–23. Viitattu 10.11.2023. [https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1537511014001317?casa\\_token=hYF\\_L9nmgAAAAA:GTpIR1zvRmqKihdBbUC6lgm6dDTaISZoUSBUguLSq6-8T8cVKsiKz5GWonDV\\_glpEI0ussj6Wyc](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1537511014001317?casa_token=hYF_L9nmgAAAAA:GTpIR1zvRmqKihdBbUC6lgm6dDTaISZoUSBUguLSq6-8T8cVKsiKz5GWonDV_glpEI0ussj6Wyc)

Rämä, M. 2020. Kohti vähäpäästöistä, neljännen sukupolven kaukolämpöä. *VTT* 7.12.2020. Viitattu 15.10.2023. <https://www.vttresearch.com/fi/uutiset-ja-tarinat/kohti-vahapaastoista-neljannen-sukupolven-kaukolampoa>

Salmela, S. 2004. Kuluttajat vihreän sähkön markkinoilla, tarkastelu ympäristövastuullisen käyttäytymisen esteistä. Ympäristösuojelutieteen pro gradu -työ. Bio- ja ympäristötieteiden laitos. Helsinki: Helsingin yliopisto. [https://www.sitra.fi/app/uploads/b/7/r/kh27bgvabfgdntspw7tn6a/suvi\\_salmela\\_vihrea\\_sahko.pdf](https://www.sitra.fi/app/uploads/b/7/r/kh27bgvabfgdntspw7tn6a/suvi_salmela_vihrea_sahko.pdf)

Schmitt, A. & Zhou, H. 2022. EU Energy Outlook to 2060: how will power prices and revenues develop for wind, solar, gas, hydrogen + more. Viitattu 16.10.2023. <https://energypost.eu/eu-energy-outlook-to-2060-how-will-power-prices-and-revenues-develop-for-wind-solar-gas-hydrogen-more/>

SFS 1539. Rakennuksen pinta-alat. Helsinki: Suomen standardoimisliitto

SFS-EN ISO 14040:2006 + A1:2020. Ympäristöasioiden hallinta. Elinkaariarviointi. Periaatteet ja pääpiirteet. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto

SFS-EN ISO 14044:2006 + A1:2018 + A2:2020. Ympäristöasioiden hallinta. Elinkaariarviointi. Vaatimukset ja suuntaviivoja. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto

SFS-EN ISO 14067:2018. Kasvihuonekaasut. Tuotteiden hiilijalanjälki. Hiilijalanjäljen laskemista koskevat vaatimukset ja ohjeet. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto

Seppälä, J.; Ollikainen, M.; Savolainen, H.; Häkkinen, T.; Saarinen, M.; Liimatainen, H.; Vainio, A.; Kurnitski, J.; Niemisto, J.; Niva, M. ja Weaver, S. 2022. Kuluttajien mahdollisuudet Suomen päästövähennysten vauhdittamiseksi. Suomen ilmastopaneelin raportti 5/2022.

Seppänen & Apilo. 2023. Environmental Product Declaration. Gebwell Ltd. Taurus Heat Pumps. 80 EVI, 110 EVI, Inverter Pro. Viitattu 10.11.2023.  
<https://gebwell.fi/app/uploads/2023/04/Gebwell-Taurus-EPD.pdf>

Siljander, R.; Cederlöf, M.; Skoglund, K. & Herronen, V. 2023. Ilmastovuosikertomus 2023. Ympäristöministeriön julkaisuja 2023:27. Helsinki: Ympäristöministeriö

Soimakallio, S. 2020. Specific emissions for district heat, district cooling and electricity used in buildings. Suomen ympäristökeskus 11.1.2020. Viitattu 1.11.2023.  
<https://co2data.fi/rakentaminen/reports/Energy%20service%20R01.00.pdf>

Suomen ilmastopaneeli. 2020. Suomalaisten kotitalouksien hiilijalanjäljen pienennyttävä 70 prosenttia – vähähiilisiä vaihtoehtoja voidaan tukea myös ohjauskeinoin. Tiedote 30.9.2020. Viitattu 5.9.2023.  
<https://www.ilmastopaneeli.fi/tiedotteet/suomalaisten-kotitalouksien-hiilijalanjaljen-pienennyttava/>

Suomen virallinen tilasto. 2017. Tieliikenteen tavarankuljetukset. Verkkojulkaisu. ISSN=1798-2995. 2017, Liitetaulukko 10. Keskimääräinen kuljetusmatka ja kuormausaste kotimaan liikenteessä tavaralajeittain vuonna 2017. Helsinki: Tilastokeskus. Viitattu 13.11.2023.  
[http://www.stat.fi/til/kttav/2017/kttav\\_2017\\_2018-04-26\\_tau\\_010\\_fi.html](http://www.stat.fi/til/kttav/2017/kttav_2017_2018-04-26_tau_010_fi.html)

SYKE. 2022. Elinkaariarviointi. Viitattu 21.9.2023.  
<https://www.syke.fi/elinkaariarviointi>

SYKE. 2023. F-kaasut ja otsonikerrosta heikentävät aineet. Viitattu 19.10.2023.  
<https://www.ymparisto.fi/fi/luvat-ja-veloitteet/f-kaasut-ja-otsonikerrosta-heikentavat-aineet#Yleisi%C3%A4%20F-kaasukylym%C3%A4aineita>

Tilastokeskus. n.d.a. GWP-kertoimet. Viitattu 27.11.2023.  
[https://www.stat.fi/meta/kas/gwp\\_kertoimet.html](https://www.stat.fi/meta/kas/gwp_kertoimet.html)

Tilastokeskus. n.d.b. Tieliikenteen tonnikilometri. Viitattu 27.11.2023.

[https://www.stat.fi/meta/kas/tieliiken\\_tkm.html](https://www.stat.fi/meta/kas/tieliiken_tkm.html)

Tilastokeskus. 2022. Maalämpö yleistynyt pääasiallisena lämmitystapana.

Tiedote 6.10.2022. Viitattu 20.11.2023.

<https://www.stat.fi/julkaisu/cktwror9c4ee10b618t3njtsh>

Tom Allen Senera. n.d.a. Maalämpö. Viitattu 17.10.2023.

<https://www.tomallensenera.fi/maalampo>

Tom Allen Senera. n.d.b. Lämmön talteenotto. Viitattu 23.11.2023.

<https://www.tomallensenera.fi/lammon-talteenotto>

Työ- ja elinkeinoministeriö. 2022. TEM lausunto ympäristöministeriön asetus rakennuksen ilmastaselvityksestä. Viitattu 2.11.2023.

[https://api.hankeikkuna.fi/asiakirjat/034d0bd9-2c32-4131-9dd1-796facde0f86/8ef2674f-94b6-460e-96d7-2c3e42028a6e/LAUSUNTO\\_20221116080243.PDF](https://api.hankeikkuna.fi/asiakirjat/034d0bd9-2c32-4131-9dd1-796facde0f86/8ef2674f-94b6-460e-96d7-2c3e42028a6e/LAUSUNTO_20221116080243.PDF)

Töyli, O. 2023. Haastattelu. AFRY Buildings Finland Oy:n johtavaa asiantuntijaa (Technical Due Diligence) Olavi Töyliä haastatteli 18.10.2023 Timo Heikkilä.

Ulkoministeriö. n.d. Agenda 2030 – kestävän kehityksen tavoitteet. Viitattu

11.10.2023. <https://static.um.fi/agenda-2030-kestavan-kehityksen-tavoitteet>

Vihanta, A. 2023. Tuulivoimarakentamisen kulta-aika on ohi: Suurin kysyntä on tyydytetty ja uudet investoinnit jäissä. Yle Uutiset 12.9.2023. Viitattu

15.10.2023. <https://yle.fi/a/74-20048410>

WWF. 2023. Suomen ylikulutuspäivä on huomenna. Mediatiedotteet 30.3.2023.

Viitattu 5.9.2023. <https://wwf.fi/uutiset/2023/03/suomen-ylikulutuspaiva-on-huomenna/>

Ympäristöministeriö. 2019. Rakennuksen vähähiilisuuden arviointimenetelmä.

Ympäristöministeriön julkaisuja 2019:22. Saatavilla:

<https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/handle/10024/161761>

Ympäristöministeriö. 2021. Rakennuksen vähähiilisuuden arviointimenetelmä

2021. Luonnos lausuntokierrosta varten 6/2021. Viitattu 25.10.2023.

<https://www.lausuntopalvelu.fi/FI/Proposal/DownloadProposalAttachment?proposalId=0b297461-cdee-4657-9a4e-d2791315257d&attachmentId=15860>

Ympäristöministeriö. 2023. IPCC:n raportti: Nyt tehtävät päätökset vaikuttavat tuhansia vuosia – ilmastonmuutoksen haasteisiin mahdollista vastata nopeilla ja laajoilla toimilla. Tiedote 20.3.2023. Viitattu 21.9.2023. <https://valtioneuvosto.fi/-/1410903/ipcc-n-raportti-nyt-tehtavat-paatokset-vaikuttava-tuhansia-vuosia-ilmastonmuutoksen-haasteisiin-mahdollista-vastata-nopeilla-ja-laajoilla-toimilla>

Ökobaumat. 2022a. Process Data set: Buffer storage (stainless steel). Viitattu 20.11.2023. [https://oekobaumat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=6899ae8e-86d3-42d0-a1ba-efe711b3aef2&version=20.23.050&stock=OBD\\_2023\\_I&lang=en](https://oekobaumat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=6899ae8e-86d3-42d0-a1ba-efe711b3aef2&version=20.23.050&stock=OBD_2023_I&lang=en)

Ökobaumat. 2022b. Process Data set: Electric heat pump (brine-water, geothermal probe) 10 kW. Viitattu 20.11.2023. [https://oekobaumat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=d939cdd6-98eb-4fcd-9e30-c77ded7a5399&version=20.23.050&stock=OBD\\_2023\\_I&lang=en](https://oekobaumat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=d939cdd6-98eb-4fcd-9e30-c77ded7a5399&version=20.23.050&stock=OBD_2023_I&lang=en)

Ökobaumat. 2022c. Process Data set: Electric heat pump (brine-water, geothermal probe) 20 kW. Viitattu 20.11.2023. [https://oekobaumat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=37ca01de-bb46-4648-a937-7ac200da6142&version=20.23.050&stock=OBD\\_2023\\_I&lang=en](https://oekobaumat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=37ca01de-bb46-4648-a937-7ac200da6142&version=20.23.050&stock=OBD_2023_I&lang=en)

Ökobaumat. 2022d. Process Data set: Pipework for electric heat pump (brine-water, geothermal probe) 70 kW. Viitattu 20.11.2023. [https://oekobaumat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=c31b821c-214e-4f6f-894f-5f524949e51d&version=20.23.050&stock=OBD\\_2023\\_I&lang=en](https://oekobaumat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=c31b821c-214e-4f6f-894f-5f524949e51d&version=20.23.050&stock=OBD_2023_I&lang=en)

Ökobaumat. 2022e. Process Data set: Pipework for electric heat pump (brine-water, geothermal probe) 10 kW. Viitattu 20.11.2023. [https://oekobaumat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=87e96a7e-8a0b-432f-930b-6b06d07c12c7&version=20.23.050&stock=OBD\\_2023\\_I&lang=en](https://oekobaumat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=87e96a7e-8a0b-432f-930b-6b06d07c12c7&version=20.23.050&stock=OBD_2023_I&lang=en)

Ökobaumat. 2022f. Process Data set: Pipework for electric heat pump (brine-water, geothermal probe) 20 kW. Viitattu 20.11.2023. [https://oekobaumat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=93a80673-df5c-4432-958f-f241ff31fd9a&version=20.23.050&stock=OBD\\_2023\\_I&lang=en](https://oekobaumat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=93a80673-df5c-4432-958f-f241ff31fd9a&version=20.23.050&stock=OBD_2023_I&lang=en)

Ökobaudat. 2022g. Process Data set: Pipework for electric heat pump (brine-water, geothermal probe) 70 kW. Viitattu 20.11.2023.

[https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=734f7419-1378-4b79-af5e-09297e5965d9&version=20.23.050&stock=OBD\\_2023\\_I&lang=en](https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=734f7419-1378-4b79-af5e-09297e5965d9&version=20.23.050&stock=OBD_2023_I&lang=en)

Ökobaudat. 2022h. Process Data set: Electric heat pump (air-water) 7 kW; 1 piece. Viitattu 17.11.2023.

[https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=d59fef8-7a26-499b-a9d8-7149b5d3de24&version=20.23.050&stock=OBD\\_2023\\_I&lang=en](https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=d59fef8-7a26-499b-a9d8-7149b5d3de24&version=20.23.050&stock=OBD_2023_I&lang=en)

Ökobaudat. 2022i. Process Data set: Electric heat pump (air-water) 10 kW; 1 piece. Viitattu 17.11.2023.

[https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=00ab3cef-5d1b-48c8-a220-4f8ac01b7dd7&version=20.23.050&stock=OBD\\_2023\\_I&lang=en](https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=00ab3cef-5d1b-48c8-a220-4f8ac01b7dd7&version=20.23.050&stock=OBD_2023_I&lang=en)

Ökobaudat. 2022j. Process Data set: Electric heat pump (air-water) 14 kW; 1 piece. Viitattu 17.11.2023.

[https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=19a1a962-7b4b-45e8-8446-c82a15675925&version=20.23.050&stock=OBD\\_2023\\_I&lang=en](https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=19a1a962-7b4b-45e8-8446-c82a15675925&version=20.23.050&stock=OBD_2023_I&lang=en)



## Liite 1. Asiantuntijahaastattelun haastattelukysymykset

Asiantuntijahaastattelu toteutettiin 18.10.2023 puhelinhaastatteluna. Haastateltavana toimi AFRY Buildings Finland Oy:n johtava asiantuntija (Technical Due Diligence) Olavi Töyli. Haastattelijana toimi Timo Heikkilä.

Kysymykset:

1. RT-kortiston teknisiä käyttöikiä listaava ohjekortti RT 18-10922 on vuodelta 2008. Kuinka luotettavana näet kortin käyttöikämääritelmät tänä päivänä? Olisiko tietoja tarve päivittää?
2. Milloin uusi versio ohjekortista olisi mahdollisesti valmis?
3. Miten luotettavina voidaan pitää valmistajien omia väittämiä tuotteiden käyttöiästä?
4. Onko mielestäsi olemassa olevissa käyttöikä tiedoissa yleisemmin puutteita esimerkiksi tiettyjen tuoteryhmien kohdalla?

## Liite 2. Järjestelmäosien päästökertoimet

JÄRJESTELMÄOSIEN PÄÄSTÖKERTOIMET			A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4	D1	D2	
Elinkaaren vaiheet	Yksikkö	kg/yksikkö																			
<b>AURINKOENERGIA</b>																					
<b>Aurinkopaneelit</b>																					
CO2data	kg CO2e/paneeli	19,5	210,405														9,75	-	-9,945	-0,39	<a href="https://co2data.fi/rakentam">https://co2data.fi/rakentam</a>
<b>Invertterit</b>																					
Ympäristöministeriö (2019)	kg CO2e/kpl	20	22														-	-	-	-	<a href="https://julkaissut.valtioneuv">https://julkaissut.valtioneuv</a>
<b>Aurinkokeräimet</b>																					
, tasokeräin	kg CO2e/m2	17,5	108,68														3,675	-	-35,35	-	<a href="https://co2data.fi/rakentam">https://co2data.fi/rakentam</a>
- Ökobaudet, tyhjiöputkikeräin	kg CO2e/m2	29,5	89,73														2,02	0,3412	-30,99	-	<a href="https://oekobaudat.de/OE">https://oekobaudat.de/OE</a>
- Ökobaudet, tasokeräin	kg CO2e/m2	18,27	93,45														1,004	0,1866	-45,63	-	<a href="https://oekobaudat.de/OE">https://oekobaudat.de/OE</a>
<b>LÄMPÖPUMPUJÄRJESTELMÄT</b>																					
<b>Maalämpökaivo</b>																					
- Lämpökaivo	kg CO2e/m	-	12,21														-	-	-	-	<a href="https://mdpi-res.com/boo">https://mdpi-res.com/boo</a>
<b>Maalämpöpumppu</b>																					
- Lämpöpumppu, 17 kW	kg CO2e/laite		3 164,79														-	-	-	-	<a href="https://mdpi-res.com/boo">https://mdpi-res.com/boo</a>
- Gebwell Taurus, 70–100 kW	kg CO2e/laite	750	3 673,00														0,354	-	-1,11	-	<a href="https://gebwell.fi/app/uplo">https://gebwell.fi/app/uplo</a>
- Ökobaudet, 10 kW, porakaivo	kg CO2e/laite	563	837														4,282	0,1191	-128,3	-	<a href="https://oekobaudat.de/OE">https://oekobaudat.de/OE</a>
- Ökobaudet, 20 kW, porakaivo	kg CO2e/laite	1498	1943														4,282	0,1191	-128,3	-	<a href="https://oekobaudat.de/OE">https://oekobaudat.de/OE</a>
- Ökobaudet, 70 kW, porakaivo	kg CO2e/laite	4855	6 070,00														11,35	0,1928	-217,6	-	<a href="https://oekobaudat.de/OE">https://oekobaudat.de/OE</a>
- Ökobaudet, 10 kW, energiakenttä	kg CO2e/laite	139	336,70														4,282	0,1191	-128,3	-	<a href="https://oekobaudat.de/OE">https://oekobaudat.de/OE</a>
- Ökobaudet, 20 kW, energiakenttä	kg CO2e/laite	184,2	389,00														4,282	0,1191	-128,3	-	<a href="https://oekobaudat.de/OE">https://oekobaudat.de/OE</a>
- Ökobaudet, 70 kW, energiakenttä	kg CO2e/laite	488,9	909,00														11,35	0,1928	-217,6	-	<a href="https://oekobaudat.de/OE">https://oekobaudat.de/OE</a>
<b>Ilmalämpöpumput</b>																					
CO2data	kg CO2e/laite	50,5	1 034,24														-	-	-78,78	-1,515	<a href="https://co2data.fi/rakentam">https://co2data.fi/rakentam</a>
<b>Ilma-vesilämpöpumput</b>																					
Ökobaudet, 7 kW	kg CO2e/laite	93,8	319,40														20,37	3,586	-134,6	-	<a href="https://oekobaudat.de/OE">https://oekobaudat.de/OE</a>
Ökobaudet, 10 kW	kg CO2e/laite	134	456,20														29,1	5,122	-192,2	-	<a href="https://oekobaudat.de/OE">https://oekobaudat.de/OE</a>
Ökobaudet, 14 kW	kg CO2e/laite	178,6	638,7														40,74	7,171	-269,1	-	<a href="https://oekobaudat.de/OE">https://oekobaudat.de/OE</a>
<b>Poistoilmalämpöpumput</b>																					
- Lämpöpumppu, ks. Maalämpö	-	-	-														-	-	-	-	
<b>Lämmöntalteenotto</b>																					
- Ilmanvaihtokone LTO-yksiköllä, CO2data	kg CO2e/laite	477	2 003,40														0,954	-	-725,04	-	<a href="https://co2data.fi/rakentam">https://co2data.fi/rakentam</a>
<b>Kompressori</b>																					
- Kompressori, Danfoss TTH375	kg CO2e/laite	168,57	1 870,00														13,4	11,17	-131,9	-	<a href="https://assets.danfoss.com">https://assets.danfoss.com</a>
<b>LÄMMÖNSIIRTOVERKKO</b>																					
<b>Lämmönsiirtoputkistot, PEX</b>																					
CO2data	kg CO2e/m	0,212	0,64448														0,636	-	-	-0,042	<a href="https://co2data.fi/rakentam">https://co2data.fi/rakentam</a>
<b>Kupariputki</b>																					
CO2data	kg CO2e/m3	8960	6 988,80														17,92	-	-26 880	-	<a href="https://co2data.fi/rakentam">https://co2data.fi/rakentam</a>
<b>Ruostumaton teräsputki</b>																					
CO2data	kg CO2e/m3	7900	33 970,00														15,8	-	-10 270	-	<a href="https://co2data.fi/rakentam">https://co2data.fi/rakentam</a>
<b>Vesipumppu</b>																					
CO2data	kg CO2e/laite	6,5	46,475														0,013	-	-5,2	-0,26	<a href="https://co2data.fi/rakentam">https://co2data.fi/rakentam</a>
<b>Lämmönjakokeskus</b>																					
Ympäristöministeriö (2019)	kg CO2e/m2	254	0,53														32,051	-	-	-	<a href="https://julkaissut.valtioneuv">https://julkaissut.valtioneuv</a>
<b>Lämpövaraaja</b>																					
Ökobaudet, teräs	kg CO2e/500 l	88,3	264,4585														50,534	0,0777	-101,987	-	<a href="https://oekobaudat.de/OE">https://oekobaudat.de/OE</a>
Ökobaudet, ruostumaton teräs	kg CO2e/500 l	88,3	352,9351														50,534	0,0777	-93,6863	-	<a href="https://oekobaudat.de/OE">https://oekobaudat.de/OE</a>
<b>Maalämmön lämmönsiirtoputkisto</b>																					
- Ökobaudet, 10 kW, porakaivo	kg CO2e/laite	188,8	593,5														0	-	-	-	<a href="https://oekobaudat.de/OE">https://oekobaudat.de/OE</a>
- Ökobaudet, 20 kW, porakaivo	kg CO2e/laite	551,5	1 749														0	-	-	-	<a href="https://oekobaudat.de/OE">https://oekobaudat.de/OE</a>
- Ökobaudet, 70 kW, porakaivo	kg CO2e/laite	1843,4	5843														0	-	-	-	<a href="https://oekobaudat.de/OE">https://oekobaudat.de/OE</a>
- Ökobaudet, 10 kW, energiakenttä	kg CO2e/laite	141	359,8														0	-	-	-	<a href="https://oekobaudat.de/OE">https://oekobaudat.de/OE</a>
- Ökobaudet, 20 kW, energiakenttä	kg CO2e/laite	282	719,6														0	-	-	-	<a href="https://oekobaudat.de/OE">https://oekobaudat.de/OE</a>
- Ökobaudet, 70 kW, energiakenttä	kg CO2e/laite	987	2518														0	-	-	-	<a href="https://oekobaudat.de/OE">https://oekobaudat.de/OE</a>

## Liite 3. Asuinkerrostalojen keskiarvoinen energia- ja vedenkulutus Turussa

ASUINKERROSTALON KULUTUS: KESKIARVO													Lähde: AFRY Monitor	
Keskiarvoinen rakennusvuosi			1979		Kohteiden sijainti			Turku	Kohteiden tyyppi			Asuinkerrostalo		
Rakennustilavuus			- keskiarvo	22174 m <sup>3</sup>	Kohteiden määrä			16 kpl	Lämmitysmuoto			Kaukolämpö		
			- mediaani	15564 m <sup>3</sup>					Ilmanvaihto			Keskitetty poisto		
LÄMPÖ, kWh/m <sup>3</sup>														
	tammi.19	helmi.19	maalis.19	huhti.19	touko.19	kesä.19	heinä.19	elo.19	syys.19	loka.19	marras.19	joulu.19	2019	
keskiarvo	4,8	3,7	3,9	2,5	1,8	1,0	1,0	0,9	1,6	3,0	3,5	3,6	31,3	
mediaani	4,8	3,6	3,6	2,4	1,8	0,9	0,8	0,8	1,6	3,0	3,3	3,5	30,1	
	tammi.20	helmi.20	maalis.20	huhti.20	touko.20	kesä.20	heinä.20	elo.20	syys.20	loka.20	marras.20	joulu.20	2020	
keskiarvo	3,6	3,6	3,6	2,8	2,0	0,9	0,9	0,9	1,3	2,3	2,9	3,8	28,6	
mediaani	3,5	3,4	3,4	2,7	1,9	0,9	0,8	0,9	1,2	2,1	2,8	3,6	27,1	
	tammi.21	helmi.21	maalis.21	huhti.21	touko.21	kesä.21	heinä.21	elo.21	syys.21	loka.21	marras.21	joulu.21	2021	
keskiarvo	4,7	4,6	3,9	2,7	1,8	0,9	0,8	1,0	1,8	2,4	3,6	4,9	32,9	
mediaani	4,4	4,4	3,6	2,5	1,7	0,8	0,7	1,0	1,8	2,5	3,7	4,9	31,8	
	tammi.22	helmi.22	maalis.22	huhti.22	touko.22	kesä.22	heinä.22	elo.22	syys.22	loka.22	marras.22	joulu.22	2022	
keskiarvo	4,3	3,9	3,6	2,8	1,7	0,9	0,8	0,9	1,7	2,2	3,3	4,4	30,6	
mediaani	4,3	3,9	3,5	2,8	1,7	0,9	0,8	0,8	1,7	2,2	3,1	4,2	29,8	
NORM.LÄMPÖ, kWh/m <sup>3</sup>														
	tammi.19	helmi.19	maalis.19	huhti.19	touko.19	kesä.19	heinä.19	elo.19	syys.19	loka.19	marras.19	joulu.19	2019	
keskiarvo	4,7	4,5	4,2	3,0	1,8	1,0	1,0	0,9	1,6	2,9	3,8	4,4	33,8	
mediaani	4,7	4,5	4,0	3,0	1,9	0,9	0,8	0,8	1,6	2,8	3,6	4,6	33,1	
	tammi.20	helmi.20	maalis.20	huhti.20	touko.20	kesä.20	heinä.20	elo.20	syys.20	loka.20	marras.20	joulu.20	2020	
keskiarvo	4,8	4,4	4,1	2,7	1,7	0,9	0,9	0,9	1,5	2,9	3,6	4,6	33,3	
mediaani	4,8	4,4	4,0	2,6	1,6	0,9	0,8	0,9	1,3	2,5	3,7	4,4	31,9	
	tammi.21	helmi.21	maalis.21	huhti.21	touko.21	kesä.21	heinä.21	elo.21	syys.21	loka.21	marras.21	joulu.21	2021	
keskiarvo	4,8	4,5	4,2	2,7	1,8	0,9	0,8	1,0	1,5	2,8	3,7	4,4	33,3	
mediaani	4,5	4,3	3,9	2,5	1,7	0,8	0,7	1,0	1,5	2,9	3,8	4,4	32,0	
	tammi.22	helmi.22	maalis.22	huhti.22	touko.22	kesä.22	heinä.22	elo.22	syys.22	loka.22	marras.22	joulu.22	2022	
keskiarvo	4,7	4,5	4,0	2,7	1,7	0,9	0,8	0,9	1,4	2,5	3,7	4,5	32,3	
mediaani	4,7	4,4	3,9	2,7	1,7	0,9	0,8	0,8	1,4	2,6	3,4	4,3	31,5	
SÄHKÖ, kWh/m <sup>3</sup>														
	tammi.19	helmi.19	maalis.19	huhti.19	touko.19	kesä.19	heinä.19	elo.19	syys.19	loka.19	marras.19	joulu.19	2019	
keskiarvo	1,13	1,00	1,04	0,88	0,86	0,73	0,75	0,77	0,83	0,98	1,01	1,02	11,0	
mediaani	1,16	1,03	1,10	0,90	0,93	0,77	0,78	0,81	0,87	1,02	1,06	1,04	11,5	
	tammi.20	helmi.20	maalis.20	huhti.20	touko.20	kesä.20	heinä.20	elo.20	syys.20	loka.20	marras.20	joulu.20	2020	
keskiarvo	1,05	0,98	1,01	0,87	0,86	0,71	0,75	0,76	0,87	0,98	1,04	1,09	11,0	
mediaani	1,08	1,00	1,05	0,92	0,87	0,76	0,81	0,86	0,91	1,07	1,11	1,16	11,6	
	tammi.21	helmi.21	maalis.21	huhti.21	touko.21	kesä.21	heinä.21	elo.21	syys.21	loka.21	marras.21	joulu.21	2021	
keskiarvo	1,13	1,05	1,05	0,88	0,86	0,74	0,77	0,81	0,90	1,02	1,09	1,12	11,4	
mediaani	1,23	1,13	1,17	0,97	0,91	0,86	0,87	0,88	0,97	1,13	1,17	1,21	12,5	
	tammi.22	helmi.22	maalis.22	huhti.22	touko.22	kesä.22	heinä.22	elo.22	syys.22	loka.22	marras.22	joulu.22	2022	
keskiarvo	1,15	1,03	1,03	0,94	0,87	0,75	0,77	0,81	0,86	0,97	1,04	1,06	11,3	
mediaani	1,29	1,09	1,06	0,96	0,92	0,82	0,83	0,88	0,89	1,06	1,17	1,19	12,2	
VESI, dm <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>														
	tammi.19	helmi.19	maalis.19	huhti.19	touko.19	kesä.19	heinä.19	elo.19	syys.19	loka.19	marras.19	joulu.19	2019	
keskiarvo	28,1	25,2	28,6	27,8	26,4	23,1	23,4	25,0	25,9	27,9	26,4	23,5	311,4	
mediaani	29,4	28,2	29,6	28,4	26,7	23,4	23,5	25,0	25,5	30,1	26,6	24,3	320,7	
	tammi.20	helmi.20	maalis.20	huhti.20	touko.20	kesä.20	heinä.20	elo.20	syys.20	loka.20	marras.20	joulu.20	2020	
keskiarvo	26,7	25,5	27,9	25,8	27,7	23,5	23,6	23,9	27,4	27,4	27,2	24,9	311,5	
mediaani	28,2	25,6	29,0	24,8	25,2	23,5	26,0	24,6	29,9	28,5	28,9	26,2	320,3	
	tammi.21	helmi.21	maalis.21	huhti.21	touko.21	kesä.21	heinä.21	elo.21	syys.21	loka.21	marras.21	joulu.21	2021	
keskiarvo	27,8	26,0	28,1	26,2	27,0	23,2	24,0	25,3	26,8	27,5	27,3	25,2	314,5	
mediaani	26,9	25,7	28,0	25,2	25,3	23,3	23,8	26,1	27,3	26,6	27,1	24,2	309,5	
	tammi.22	helmi.22	maalis.22	huhti.22	touko.22	kesä.22	heinä.22	elo.22	syys.22	loka.22	marras.22	joulu.22	2022	
keskiarvo	26,4	25,2	25,7	25,1	24,6	21,4	23,0	24,5	25,7	26,7	26,8	23,6	298,8	
mediaani	25,1	26,7	23,7	23,7	23,4	22,6	22,8	24,3	25,4	26,6	26,7	23,0	293,8	

## Liite 4. Vertailun järjestelmien hiilidioksidipäästöt moduuleittain

