

Petra Lietosaari

TALOTEKNIikka OSANA VÄHÄHIILISTÄ RAKENTAMISTA

Opetusrakennuksen hiilijalanjälki

Opinnäytetyö

Tekniikan ammattikorkeakoulututkinto

Ympäristötekniikan koulutus

2023



**Kaakkois-Suomen
ammattikorkeakoulu**

Tutkintonimike	Insinööri (AMK)
Tekijä/Tekijät	Petra Lietosaari
Työn nimi	Talotekniikka osana vähähiilistä rakentamista – Opetusrakennuksen hiilijalanjälki
Toimeksiantaja	A-insinöörit
Vuosi	2023
Sivut	46 sivua
Työn ohjaaja	Johanna Arola

TIIVISTELMÄ

Rakennukset vastaavat noin kolmanneksesta ilmastonmuutosta aiheuttavista kasvihuonekaasupäästöistä. Vähähiilisellä rakentamisella voidaan vaikuttaa rakennussektorin hiilijalanjälkeen ja ilmastonmuutoksen kehittymiseen merkittävästi. Rakennussektorin suurin päästöjen aiheuttaja on fossiilisiin polttoaineisiin perustuva energiankulutus, mutta myös rakennusmateriaaleilla on raskas hiilijalanjälki. Materiaalipohjaisten päästöjen syynä ovat erityisesti hiili-intensiiviset rakentamisen raaka-aineet, kuten teräs, sementti ja muovi.

Taloteknisten järjestelmien osuutta rakennusten hiilijalanjäljestä on tutkittu vasta vähän ja sen selvittäminen järjestelmien monimutkaisuuden ja moniosaisuuden vuoksi on haastavaa. Yleisen oletuksen mukaan talotekniikan osuus rakennuksen materiaalisidonnaisista päästöistä on pieni (n. 10–15 %), mutta rakennustyyppi ja varustelutaso vaikuttavat selvästi talotekniikan materiaalmääriin ja sitä kautta päästöihin. Talotekniikan suurin materiaalisidonnaisten kasvihuonekaasupäästöjen lähde on paljon terästä sisältävä ilmanvaihtojärjestelmä. Rakennuksen käytönaikaiseen energiankulutukseen talotekniikalla on mahdollista vaikuttaa huomattavasti, mm. erilaisten lämmitysjärjestelmien ja lämmöntalteenoton menetelmillä.

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää talotekniikan osuutta vähähiilisessä rakentamisessa tarkastelemalla kolmea Lohjan kaupungin opetusrakennusta. Vähähiilisen rakentamisen yhteiskunnalliseen merkitykseen keskittyvän kirjallisuuskatsauksen ja kvantitatiivisen One Click LCA -ohjelmalla toteutetun hiilijalanjälkilaskennan avulla selvitettiin peruskoulujen taloteknisten järjestelmien 50 vuoden elinkaaren aikana syntyvien kasvihuonekaasupäästöjen määrää. Tutkimustulokset osoittivat, että öljylämmitteisen opetusrakennuksen käytönaikaiset lämmittämisestä aiheutuvat päästöt olivat yli 12-kertaiset kaukolämmöllä lämpiävään energiatehokkaampaan koulurakennukseen verrattuna. Rakennuksen parempi energiatehokkuus nosti kuitenkin taloteknisten järjestelmien materiaalisidonnaisten päästöjen osuutta rakennuksen kokonaishiilijalanjäljestä. Kun vähemmän energiatehokkaissa kouluissa taloteknisten järjestelmien osuus oli maksimissaan n. 14 %, niin energiatehokkaassa opetusrakennuksessa talotekniikan materiaalisidonnaiset päästöt olivat n. 21 %.

Asiasanat: talotekniikka, vähähiilinen rakentaminen, hiilijalanjälki, ilmastonmuutos, opetusrakennus

Degree title	Bachelor of Engineering
Author (authors)	Petra Lietosaari
Thesis title	Building Technology as part of Low-Carbon Construction – Carbon Footprint of Educational Buildings
Commissioned by	A-insinööri
Time	2023
Pages	46 pages
Supervisor	Johanna Arola

ABSTRACT

Buildings are responsible for about a third of the greenhouse gas emissions that cause climate change. Low-carbon construction can significantly affect the carbon footprint of the construction sector and the development of climate change. The biggest source of emissions in the construction sector is energy consumption based on fossil fuels, but construction materials also have a heavy carbon footprint. The cause of material-based emissions is especially carbon-intensive construction raw materials, such as steel, cement, and plastic.

The share of technical systems in the carbon footprint of buildings has only been studied a little, and it is challenging to find out due to the complexity and multi-part nature of the systems. According to the general assumption, the share of building technology in a building's material-related emissions is small (approximately 10–15 %), but the type of building and the level of equipment clearly affect the number of materials in building technology, and thus the emissions. The biggest source of material-related greenhouse gas emissions in building technology is the ventilation system which contains a lot of steel. Building technology can have a considerable impact on the building's energy consumption during use, e.g., with different heating systems and heat recovery methods.

The purpose of this thesis was to find out the role of building technology in low-carbon construction by examining three educational buildings in the city of Lohja. With the help of a literature review focusing on the social significance of low-carbon construction and a quantitative carbon footprint calculation carried out with the One Click LCA program, the amount of greenhouse gas emissions generated during the 50-year life cycle of comprehensive schools' building engineering systems was determined. The results showed that the emissions caused by the oil-heating in an educational building were more than 12 times higher than the more energy-efficient school building heated by district heating. The building's better energy efficiency increased the share of material-related emissions from the building technology systems in the building's total carbon footprint. While in less energy-efficient schools the share was a maximum of approximately 14%, in the energy-efficient educational building the material-related emissions of building technology were approximately 21 %.

Keywords: Building Technology, Low-Carbon Construction, Carbon Footprint, Climate Change, Educational Building

SISÄLLYS

MÄÄRITELMIÄ	5
1 JOHDANTO	6
1.1 Taustaa.....	6
1.2 Työn tarkoitus ja tavoitteet.....	6
2 RAKENTAMISEN YMPÄRISTÖVAIKUTUKSET	8
2.1 Rakentaminen ja ilmastonmuutos.....	8
2.2 Rakennusten hiilijalanjälki.....	11
2.3 Vähähiilisen rakentamisen ohjaus ja lainsäädäntö	12
2.4 Rakennusten elinkaariarviointi.....	14
3 TALOTEKNIikka OSANA VÄHÄHIILISTÄ RAKENTAMISTA	15
3.1 Taloteknisten järjestelmien hiilijalanjälki	15
3.2 hiilijalanjäljen arviointi	17
3.3 Talotekniikan tuotesidonnaiset päästöt.....	21
3.4 Rakennuksen käyttösidonnaiset päästöt	23
3.5 Keinoja talotekniikan hiilijalanjäljen pienentämiseksi	24
4 ILMASTOVAIKUTUSTEN ARVIOINTI	25
4.1 Rakennuksen vähähiilisyyden arviointimenetelmä.....	25
4.2 One Click LCA -laskentaohjelma	27
5 OPETUSRAKENNUKSEN HIILIJALANJÄLJEN SELVITYS	27
5.1 Laskennan kohteet	28
5.2 Hiilijalanjäljen laskenta.....	29
5.3 Kirjallisuuskatsaus	31
6 TULOKSET.....	31
7 POHDINTA	36
8 JOHTOPÄÄTÖKSET	40
LÄHTEET.....	44

MÄÄRITELMIÄ

Päästöt = Yleisnimitys ihmisten ympäristöön päästämistä kemiallisista yhdisteistä, joiden vaikutukset ilmastoon, vesistöön, maaperään tai ihmisten terveyteen ovat haitallisia [1].

Kasvihuonekaasu = Kemiallinen yhdiste, joka ilmakehässä absorboi lämpöä ja palauttaa sitä takaisin maanpinnalle. CFC-yhdisteet, metaani ja hiilidioksidi ovat esimerkkejä kasvihuonekaasuista [1].

Hiilijalanjälki = Kuvaa jonkin tuotteen, palvelun tai toiminnan negatiivista ilmastovaikutusta. Yksikkönä on hiilidioksidiekvivalentti. Rakennussektorilla hiilijalanjälki kuvaa tyypillisesti rakennuksen elinkaaren hiilijalanjälkeä, mutta termiä voidaan käyttää myös esim. yrityksen vuotuisten päästöjen ilmaisemiseen. [1.]

Hiilidioksidiekvivalentti = Hiilijalanjäljen yksikkö, lyhenne on CO₂e. Eri kasvihuonekaasujen ilmastoa lämmittävä vaikutus on muunnettu vastaamaan hiilidioksidin (CO₂) ilmastolämpenemispotentiaalia ilmakehässä. Esim. yhden hiilidioksidimolekyylin lämmityspotentiaalin ollessa 1, yhden metaanimolekyylin lämmityspotentiaali on 28 ja tetrafluorietaanimolekyylin lämmittävä vaikutus on 1 300. [1; 2, s. 16.]

Hiili-intensiteetti = Ilmaisee kasvihuonekaasujen määrää suhteessa tiettyyn tekijään, esim. kasvihuonekaasupäästöjen suhde yrityksen liikevaihtoon (tCO₂/€) tai päästöjen suhde tuotettua energiaa kohti (tCO₂/MWh) [1].

Hiilineutraali = Kun jonkin tuotteen, palvelun tai toiminnan tuottamat ja ilmakehästä poistamat kasvihuonekaasupäästöt ovat tasapainossa, ts. nettopäästöt ovat nolla [1].

1 JOHDANTO

1.1 Taustaa

Rakennukset kattavat maapallon pinta-alasta vain noin 1 %. Tästä huolimatta rakennettuun ympäristöön ja rakentamiseen kulutetaan yli puolet kaikista planeettamme raaka-aineista. Arvioiden mukaan Euroopassa noin kolmasosa kasvihuonekaasupäästöistä ja 40 % kokonaisenergian kulutuksesta liittyvät rakennuksiin ja rakentamiseen. Näiden lukujen valossa on rakentamista koskevien muutosten arvioitu olevan yksi kustannustehokkaimmista keinoista vähentää ilmastonmuutosta aiheuttavia päästöjä. [2, s. 18.]

Rakennetun ympäristön ilmastovaikutuksia syntyy rakennusten elinkaaren kaikissa eri vaiheissa. Elinkaaren alussa rakentamiseen käytetyt materiaalit, niiden hankinta ja itse rakentaminen vastaavat suurimmaksi osaksi rakennustuotteisiin liittyvistä päästöistä. Käyttövaiheen ilmastovaikutukset johtuvat erityisesti sisäympäristön toimivuuden ylläpitämiseen tarvittavan energian kulutuksesta, mutta myös esim. vedenkäyttö sekä kunnostustoimet aiheuttavat päästöjä. Elinkaaren lopussa ympäristöä kuormittavia tekijöitä ovat puolestaan rakennuksen purkaminen ja jätteiden käsittely. [2, s. 18–19.]

Suomessa on arvioitu tyypillisen asuinkerrostalon koko elinkaaren aikaisesta hiilijalanjäljestä 40 % muodostuvan rakennuksen materiaaleihin liittyvistä tuotesidonnaisista päästöistä ja 60 % rakennuksen energiankulutuksesta aiheutuvista käytösidonnaisista päästöistä. Esimerkiksi asuinkerrostalon rakennusmateriaalien kokonaispäästöistä talotekniikan osuuden arvioidaan yleisesti ottaen olevan vähäinen [2, s. 24–25], mutta rakennukseen asennetuilla taloteknisillä järjestelmillä on mahdollista vaikuttaa merkittävästi rakennuksen käytöstä ja energiankulutuksesta aiheutuviin ilmastovaikutuksiin [2, s. 120].

1.2 Työn tarkoitus ja tavoitteet

Ilmastonmuutos koskettaa kaikkia globaalin yhteiskuntamme osa-alueita. Ihmisperäiset toiminnot vaikuttavat voimakkaasti ympäristöön ja siinä vallitseviin olosuhteisiin. Ilmastonmuutosta aiheuttaviin moniosaisiin tekijöihin ja niiden taustasyihin on puututtava, jos kiihtyvällä vauhdilla etenevää ilmastonmuu-

tosta halutaan hillitä. Tässä opinnäytetyössä ilmastonmuutosta aiheuttavia tekijöitä käsitellään rakennussektorin näkökulmasta. Opinnäytetyössä tarkastellaan sellaisia rakentamista ja rakennuksia koskevia, ilmastonmuutokseen vaikuttavia elementtejä, jotka liittyvät talotekniikkaan ja taloteknisiin toimintoihin.

Talotekniikan osuutta rakentamisen ja rakennusten hiilijalanjäljestä on tois- taiseksi tutkittu vasta vähän. Tämän opinnäytetyön tavoitteena on selvittää ne talotekniikan osa-alueet, joilla on vaikutusta rakennusten hiilijalanjälkeen. Ta- voitteenä on kartoittaa talotekniikan osuutta sekä rakennusten aiheuttamista tuotesidonnaisista että käytönaikaisista päästöistä ja osoittaa olemassa ole- van tutkimustiedon, kvantitatiivisen hiilijalanjälkilaskennan ja tarkastelun koh- teeksi valittujen opetusrakennusten energiatodistusten avulla ne talotekniikan osa-alueet, joilla voidaan vaikuttaa rakennetun ympäristön hiilijalanjälkeen kai- kista tehokkaimmin.

Opinnäytetyön tutkimuskysymykset ovat:

- Mikä on taloteknisten järjestelmien osuus opetusrakennusten hiilijalan- jäljestä?
- Mitkä talotekniset järjestelmät vaikuttavat merkittävästi opetusraken- nusten ilmastovaikutuksiin?
- Millä taloteknisillä ratkaisuilla voidaan vaikuttaa tehokkaimmin rakenne- tun ympäristön tuotesidonnaiseen ja käytönaikaiseen hiilijalanjälkeen?

Tämän opinnäytetyön toteutusta tukevat A-insinöörien Helsingin teollisuus- ja talotekniikkasuunnittelun yksikkö, Green Building Council Finland ry ja Lohjan kaupunki. Opinnäytetyön tekijä ja toteutuksesta vastaava edustaa A-insinöö- rejä. Kestävän kehityksen asiantuntija Ella Lahtinen edustaa Green Building Council Finland ry:tä ja Lohjan kaupungin yhteyshenkilöinä toimivat talotekni- kan asiantuntija Harri Kivikangas, LVI-asiantuntija Henrietta Mikkola sekä pro- jektikoordinaattori Meeri Hartonen. Opinnäytetyön toteutusta tukeva yhteistyön muoto on asiantuntijaohjaus. Opinnäytetyön tavoitteena on tuottaa osallisille yrityksille tutkimusperäistä tietoa talotekniikan osuudesta rakennusten hiilija- lanjäljestä. Lohjan kaupungin omistamien kolmen opetusrakennuksen hiilija- lanjälkitarkastelu tuottaa myös taustatietoa kaupungin talotekniikkayksikölle opetusrakennusten talotekniikan hiilijalanjäljestä ja mahdollisista kouluraken- nusten kestävästä taloteknisistä kehitystarpeista.

2 RAKENTAMISEN YMPÄRISTÖVAIKUTUKSET

Rakentaminen ja rakennukset vaikuttavat ympäristöön monella tapaa. Rakennetun ympäristön päästöt ilmakehään, maaperään ja vesistöön aiheuttavat kaikki moninaisia ympäristövaikutuksia. Myös rakennusten sijainti voi välillisesti kuormittaa ympäristöä, mm. rakennusta käyttävien ihmisten kulkemiseen tarvittavista liikennevälineistä, tieverkostosta sekä muusta yhdyskuntateknikasta ja infrastruktuurista syntyvillä päästöillä. Ympäristövaikutusten ohella rakennukset myötävaikuttavat myös ihmisten terveyteen ja hyvinvointiin. [3.]

Rakennusten ympäristövaikutuksia arvioitaessa huomio kiinnittyy erityisesti rakennusten ilmastovaikutuksiin, sillä niiden aiheuttama paikallinen ympäristökuorma suoraan vesistöön tai maaperään on selvästi ilmakehään kohdistuvia muutoksia vähäisempi. [2, s. 20.] Ilmastovaikutusten kautta rakennussektorin päästöt aiheuttavat muutoksia kaikkialla ympäristössä, kuten merenpinnan nousemista, sateita ja myrskyjä, hellettä ja kuivuutta sekä luonnon monimuotoisuuden heikkenemistä [2, s. 12]. Maailmanlaajuisen ilmastomuutoksen yhteiskunnallinen merkitys korostaa entisestään rakentamisen ilmastovaikutusten tärkeyttä [2, s. 20].

2.1 Rakentaminen ja ilmastomuutos

Ihmisen toiminnasta aiheutuvat muutokset ilmastossa johtuvat pääasiassa fossiilisten energianlähteiden käytöstä. Tilastokeskuksen mukaan vuonna 2021 Suomen suurin kasvihuonekaasupäästöjen aiheuttaja oli laaja-alainen energiasektori. Se pitää sisällään mm. teollisuuden ja rakentamisen polttoeneräisen energiantuotannon, kaiken liikenteen sekä kotitalouksien, liiketilojen, palvelujen ja julkisen sektorin lämmityksen ja energiankäytön. Muita ilmastomuutokseen vaikuttavia päästölähteitä vuonna 2021 olivat tilastokeskuksen laskelmien mukaan maatalous, teollisuusprosessit ja tuotteiden käyttö, jätehuolto sekä metsätalous, maankäyttö ja siihen kohdistuvat muutokset. [4.] Rakentaminen ja rakennukset liittyvät tiiviisti lähes kaikkiin näihin toimintoihin [2, s. 15].

Ilmastomuutosta aiheuttavat kasvihuonekaasupäästöt jakautuvat maapallolla poikkeuksellisen epätasaisesti eri alueiden, valtioiden ja kotitalouksien välillä.

Hyväosaisten kulutukseen ja korkeaan elintasoon liittyvät päästömäärät ovat selvästi suuremmat verrattuna kehittyviin maihin. [5.] Tämä jaottelu koskee myös rakennuksia. Euroopassa rakennussektori vastaa n. 30 %:sta alueensa kasvihuonekaasupäästöistä [2, s. 18], kun taas YK:n arvioiden mukaan maailmanlaajuisessa mittakaavassa rakennusten osuus kaikista päästöistä on noin 17 %:n luokkaa [5].

Rakennusten ilmastovaikutukset aiheutuvat niiden elinkaaren monien eri vaiheiden päästöistä, joiden lähteinä toimivat rakennusmateriaalit, rakentamisen vaatimat toimenpiteet, rakennusten käyttö ja huoltaminen sekä rakennusten purkaminen jätekäsittelyineen. Rakennusmateriaalien päästöt syntyvät raaka-aineiden hankinnasta, tuotteiden valmistusprosesseista ja kuljetuksista. Rakentamisen päästölähteitä ovat puolestaan asennukset ja perustamisvaiheessa tarvittavat maansiirrot rakennuspaikalla sekä niihin liittyvät toimenpiteet, kuten massanvaihdot ja paalutukset. Rakennusten käyttövaiheessa päästöjä syntyy sisäympäristöolosuhteiden ja muun toimivuuden ylläpitämisestä, kuten lämmitysenergian ja sähkön kulutuksesta, käyttöveden lämmittämisestä sekä ilmanvaihdosta. Myös rakennuksen huoltaminen, korjaaminen, kunnostus ja osien uusiminen aiheuttavat käyttövaiheeseen kuuluvia päästöjä. Rakennuksen elinkaaren lopussa sen purkaminen, jätteiden käsittely ja kuljetus sekä mahdollinen loppusijoittaminen toimivat nekin päästölähteinä. [2, s. 19–21.]

Rakennussektorin toimintaa ohjaavat maailmanlaajuiset toimenpiteet kasvihuonekaasupäästöjen vähentämiseksi ovat toistaiseksi keskittyneet rakennusten energiankäytön tehostamiseen kehittyneen teknologian avulla ja korvaamalla fossiilisia polttoaineita uusiutuvilla energianlähteillä. Kun rakennusten energiankulutuksen päästöt saadaan näillä toimenpiteillä hallintaan, korostuu tuotesidonnaisten kasvihuonekaasupäästöjen rooli rakentamisen hiilijalanjäljestä. Energiatehokkaan rakennuksen elinkaaren aikaisista kasvihuonekaasupäästöistä jopa 80 % on arvioitu muodostuvan tuotesidonnaisista päästöistä. Energiatehokkuuden myötä rakennusten sisältämät materiaali- ja tekniikkamäärät kasvavat, mikä nostaa rakennussektorin tuotesidonnaisia kasvihuonekaasupäästöjä merkittävästi. [6.]

Rakentamiseen kulutetaan määrällisesti eniten hiili-intensiivisistä materiaaleista valmistettuja tuotteita. Viidesosa muoveista, neljäsosa alumiinista, puolet teräksestä ja lähes kaikki sementti käytetään rakentamisessa. Näiden materiaalien kulutukselle ennustetaan kuluvan vuosisadan loppuun mennessä moninkertaista kasvua, mikä lisää myös niistä syntyviä hiilidioksidipäästöjä. Vaikka hiili-intensiivisten tuotteiden käyttöä ja tuotantoa saataisiinkin vähennettyä ja tehostettua, ei toimenpiteet yksinään riitä supistamaan hiilidioksidipäästöjen määrää tavoiteltaessa hallitustenvälisen ilmastopaneelin, Intergovernmental Panel on Climate Change, (IPCC) asettamaa 1,5 °C:n lämpenemisen maksimirajaa. [2, s.19.]

YK:n ympäristöohjelman raportti Emission Gap Report 2022 [5] listaa rakennuslalle neljä välttämätöntä muutosta rakennusten ilmastovaikutusten pienentämiseksi:

1. Rakennetun pinta-alan määrää tulee vähentää.

Rakennuksen päästöjen suuruus on suoraan verrannollinen rakennuksen lattiapinta-alaan, sillä energian käyttö veden ja tilojen lämmittämiseen ja jäähdyttämiseen kasvaa lattiapinta-alan mukaan. Mitä suurempi lattiapinta-ala rakennuksessa on, sitä enemmän tarvitaan myös rakennusmateriaaleja, mikä lisää päästöjä.

2. Rakennusten energiankäyttöä tulee vähentää ja tehostaa entisestään.

Lämmitykseen, jäähdytykseen ja kodinkoneisiin käytettävän energian määrää tulee vähentää vuoden 2015 tasosta liiketiloissa 10–30 % ja asuinrakennuksissa 20–30 % vuoteen 2030 mennessä.

3. Fossiilisten polttoaineiden käytöstä on luovuttava ja ne on korvattava uusiutuvilla energianlähteillä, esim. lämpöpumpuilla.

Rakennusten sähköistäminen ja puhtaamman teknologian laitteet vähentävät rakennetun ympäristön päästöjä parantamalla rakennusten energiatehokkuutta.

4. Hiili-intensiivisten materiaalien ja tuotteiden käyttöä tulee vähentää.

Teräksen, sementin ja betonin käyttöä tulee tehostaa ja vähentää hyödyntämällä valmista rakennuskantaa uudisrakentamisen sijasta, minimoida tarvittavien rakennusmateriaalien volyymia ja korvata hiili-intensiivisiä raaka-aineita vaihtoehtoisilla materiaaleilla. YK:n päästöraportin mukaan kiertotaloutta hyödyntämällä ja kokonaisvaltaisella suunnittelulla on myös mahdollista pienentää rakentamisesta aiheutuvia päästöjä ja energian kulutusta.

2.2 Rakennusten hiilijalanjälki

Suurin osa rakennusten hiilijalanjäljestä muodostuu edelleen käytönajan energiankulutuksesta. Rakennuksissa energiaa kuluu käyttöveden ja sisätilojen lämmittämiseen, ilmanvaihtoon, jäähdyttämiseen, valaistukseen ja erilaisiin automaatiojärjestelmiin. [3.] Rakennuksen tuotesidonnaisia päästöjä selvästi suurempien käytönaikaisten päästöjen syynä ovat fossiiliset polttoaineet, kuten kivihiili, öljy ja turve, joita käytetään energian valmistamiseen. Kun fossiiliset polttoaineet saadaan mm. ilmasto- ja energiapolitiikan avulla korvattua vähäpäästöisillä ja uusiutuvilla energianlähteillä, koko energiantuotannon päästöt saadaan merkittävästi vähenemään. [2, s. 40.]

Kun energiaintensiivisten materiaalien valmistamiseen tarvittava energia on vähäpäästöistä tai päästötöntä, laskevat myös materiaalien aiheuttamat kasvihuonekaasupäästöt. Energiatehokkaiden rakennusten yleistyessä tarve rakennusmateriaaleille ja talotekniikalle kuitenkin kasvaa. Tämä nostaa tuotesidonnaisten päästöjen suhteellista osuutta rakennusten hiilijalanjäljestä, sillä niiden päästöjen määrä kasvaa, jotka syntyvät lisääntyneestä materiaalien valmistuksesta ja rakennuksen elinkaaren aikana tarvittavasta ylläpidosta, huollosta, osien vaihdoista ja korjauksista. [3.]

Rakentamisen hiilijalanjälkeä tarkasteltaessa on rakennustyyppin lisäksi kiinnitettävä huomiota siihen, onko kyseessä uudis- vai korjausrakentaminen. Suomessa noin puolet rakentamisesta on uudistuotantoa ja toinen puoli korjaamista. Korjausrakentamisen päästöt syntyvät pääasiassa korjauksen vaatimista tuotteista ja materiaaleista sekä purkujätteen käsittelystä, mutta korjaamisella on mahdollista vähentää rakennuksesta aiheutuvia käytönaikaisia

päästöjä mm. parantamalla rakennuksen energiatehokkuutta. Korjaamisella voidaan myös välttyä uudisrakentamiselta. Peruskorjaamista ja uudisrakentamista vertaileiden suomalaistutkimusten mukaan uudisrakennuksilla on yli 20 % raskaampi hiilijalanjälki kuin peruskorjatuilla. [2, s. 21–32.] Vaihtoehtojen vertaaminen keskenään ei ole kuitenkaan yksiselitteistä, sillä vaikka peruskorjaaminen on aina tuotesidonnaisten päästöjen osalta vähähiilisempää kuin uudisrakentaminen, voi pitkällä aikavälillä uudisrakennus osoittautua vähähiisemmäksi ratkaisuksi energiatehokkuutensa ansiosta. Toki tällöin peruskorjattavan rakennuksen energiankulutuksen on oltava poikkeuksellisen suurta ja runsaspäästöistä verrattuna vähähiiliseen uudisrakennukseen. [7.]

2.3 Vähähiilisen rakentamisen ohjaus ja lainsäädäntö

Taistelua globaalia ilmastonmuutosta vastaan ihmiskunta käy yhteisesti sovituille tavoitteille ja toimenpiteille kasvihuonekaasupäästöjen vähentämiseksi. Tärkein ilmastonmuutosta koskeva kansainvälinen sopimus on Yhdistyneiden kansakuntien puitesopimus UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change), jonka ilmastotoimia ohjaava Pariisin sopimus astui voimaan 4.11.2016. Euroopan unioni ja siihen kuuluvat jäsenmaat Suomi mukaan lukien ovat kaikki ratifioineet ja sitoutuneet Pariisin sopimukseen. Sopimuksen mukaisesti EU-maat tavoittelevat ensimmäisenä maailmassa ilmastoneutraalia yhteiskuntaa vuoteen 2050 mennessä. [8.]

YK:n Ympäristöohjelman raportti Emissions Gap Report 2022 [5] esittelee rakennussektorilla toteutettavia toimenpiteitä valtioiden hallinnoille, kansainväliselle yhteistyölle, kunnille ja kaupungeille, liiketoiminnalle, sijoittajille ja kansalaisille rakennuksiin liittyvien päästöjen vähentämiseksi. Raportin mukaan mm. valtionhallinnon tulisi huomioida lainsäädännössään siirtyminen hiilineutraaliin rakennuskantaan ja kannustaa verotuksen sekä tukien avulla rakennussektoria tavoittelemaan hiilineutraaliutta. Kansainvälisessä yhteistyössä tiedon ja taitojen kasvattaminen sekä kansainvälinen rahoitus edistävät tavoittelua kohti hiilineutraalia rakennuskantaa. Kuntien ja kaupunkien tulisi suunnitella ja toteuttaa esim. kaavoituksen avulla siirtymää kohti fossiilivapaata ja päästötöntä rakentamista. Liiketoimintaa ohjaaviksi toimenpiteiksi YK:n raportti esittää hiiliintensiivisten rakennusmateriaalien korvaamista päästöttömillä vaihtoehdoilla ja vuokrattavien kiinteistöjen muuttamista hiilineutraaleiksi. Sijoittajien tulisi

puolestaan kohdistaa panoksensa päästöttömään rakentamiseen, erityisesti korjausrakentamiseen. Kansalaisia YK:n raportti Emissions Gap Report 2022 ohjeistaa omaksumaan kodeissaan energiaa säästäviä toimintatapoja, haastamaan vuokranantajat saneeraamaan rakennuksia vähäpäästöisiksi ja suosimaan kotiansa korjausrakentamista.

Euroopan unionin hiilineutraalisuustavoitetta kunnianhimoisemmin Suomi tavoittelee Sanna Marinin vuoden 2019 hallitusohjelman mukaisesti hiilineutraalia yhteiskuntaa jo vuoteen 2035 mennessä. Luonnon monimuotoisuuden vähentämisen, ylikulutuksen ja ilmastonmuutoksen hillitsemiseksi Suomen hallitus pyrkii vaikuttamaan maapallon elinolosuhteita horjuttaviin tekijöihin monin eri keinoin. Muun muassa kiertotalouden edistäminen, päästötön sähkön- ja lämmöntuotanto sekä rakentamisen hiilijalanjäljen pienentäminen kuuluvat hallitusohjelmassa listattuihin toimenpiteisiin. [9.]

Hiilineutraalin Suomen saavuttamiseksi ympäristöministeriön tavoitteena on sisällyttää rakennusten elinkaaren aikaisen hiilijalanjäljen huomioiminen osaksi rakentamista ohjaavaa lainsäädäntöä 2020-luvun puoliväliin mennessä. Tavoitteen tueksi ympäristöministeriö on teettänyt vuonna 2017 selvityksen Vähähiilisen rakentamisen tiekartta rakentamisen ympäristövaikutusten kartoittamiseksi ja Suomen rakennusalan ilmastotavoitteiden edistämiseksi. [10.] Vähähiilistä rakentamista edistääkseen ympäristöministeriön ja Business Finlandin yhdessä luotsaama hanke Vähähiilisen rakennetun ympäristön ohjelma rahoittaa vuosina 2021–2023 40 miljoonalla eurolla kotimaisia yrityksiä, kuntia ja muita organisaatioita. Rahoituksella tuetaan yrityksiä toiminnoissaan edistää vähähiilisten tuotteiden, teknologioiden ja palvelujen kehitystä ja käyttöä rakennusten sekä infrastruktuurin rakentamisessa. [11.]

1.3.2023 Suomen eduskunta hyväksyi uuden kansallista rakentamista ohjaavan lain, joka astuu voimaan 1.1.2025. Rakentamislaki tuo ilmastonmuutoksen torjunnan osaksi rakentamisen lainsäädäntöä ohjaamalla rakentamista vähähiiliseen suuntaan. Uusi rakentamislaki ja siihen nojaavat asetukset tulevat velvoittamaan rakentajia huomioimaan rakennuksen elinkaaren aikana syntyvät ilmastohaitat ja -hyödyt ilmastaselvitysten, rakennusmateriaaliselosteiden ja hiilijalanjälkiarvioinnin avulla. [12.] Vastaavaa ohjausta ei vielä nykyisessä, uutta rakentamislakia edeltävässä maankäyttö- ja rakennuslaissa

(5.2.1999/132) ole, vaikka uudisrakennusten energiatehokkuuteen laissa esitetäänkin vaatimuksia, joiden tavoitteena on lähes nollaenergiarakennus [13].

2.4 Rakennusten elinkaariarviointi

Rakennusten ja rakentamisen ilmastovaikutusten selvitys toteutetaan Euroopassa EN-15978 standardin [14] mukaisella elinkaariarvioinnilla. Sen mukaan rakennuksen elinkaari on jaettava useampaan eri vaiheeseen tarkan ja yksiselitteisen laskentatavan turvaamiseksi. Standardin mukaisessa elinkaariarvioinnissa rakennuksen elinkaaren vaiheet jaetaan moduuleihin A, B, C ja D, joista A-C-moduuleilla on vielä omat alamoduulinsa (kuva 1).



Kuva 1. Ympäristövaikutusten elinkaariarvioinnin moduulit [2, s. 72]

Elinkaariarvioinnin vaiheet A1-A3 käsittävät rakennuksen tuotevaiheen raaka-ainehankintoineen. A4 ja A5 kattavat rakentamisvaiheen ja osiot B1-B7 vastaavat rakennuksen käyttövaiheesta. Tähän lukeutuvat mm. energian käyttö,

osien vaihdot ja korjaukset. Elinkaaren lopun ilmastovaikutuksia arvioidaan vaiheissa C1-C4. Esim. purkaminen ja purkujätteiden käsittely kuuluvat C-mo-
duulin toimintoihin. Standardin mukaisessa elinkaariarvioinnissa huomioidaan
myös rakennusmateriaalin mahdollinen uudelleenkäyttö ja kierrätys arvioinnin
vaiheessa D. [2, s. 70–72.]

3 TALOTEKNIikka OSANA VÄHÄHIILISTÄ RAKENTAMISTA

3.1 Taloteknisten järjestelmien hiilijalanjälki

Taloteknisillä järjestelmillä, kuten lämmityksellä ja ilmanvaihdolla, on suuri
merkitys rakennusten energiatehokkuuteen ja sitä kautta myös hiilijalanjäl-
keen. Järjestelmillä tuotetaan ja jaetaan energiaa, mutta myös energian tal-
teen ottaminen onnistuu talotekniikkaa hyödyntäen. Uusiutuvan energian käy-
töllä, rakennukseen valitulla lämmitysjärjestelmällä, ilmanvaihdolla ja lämmön
talteenoton ratkaisuilla voidaan vaikuttaa rakennuksen hiilijalanjälkeen merkit-
tävästi. Taloteknisten järjestelmien optimaalinen ja tarpeenmukainen säätö
sekä taloautomaation hyödyntäminen ovat esimerkkejä rakennuksen energi-
ankäytöstä aiheutuvien päästöjen vähentämiskeinoista. [2, s. 120.]

Talotekniikan osuus rakennuksen elinkaaren aikana syntyvistä päästöistä voi
vaihdella suuresti rakennuksen käyttötarkoituksen ja valittujen talotekniikkarat-
kaisujen mukaan. Eroavaisuudet rakennusten geometriassa ja varustusta-
sossa vaikuttavat merkittävästi talotekniikan osuuteen rakennuksen hiilijalan-
jäljestä. Jos esimerkiksi kerrostaloissa märkätiloja ja teknisiä kuiluja päästään
sijoittamaan optimaalisesti päällekkäin, saadaan putkiin, kanaviin ja niiden
eristeisiin kuluvia materiaalmääriä minimoitua ja vähennettyä näin talotekniik-
kaan liittyviä tuotesidonnaisia päästöjä. [2, s. 24.]

Talotekniikan osuutta rakennuksen hiilijalanjäljestä ovat selvittäneet mm.
sveitsiläiset kestävän rakentamisen asiantuntijat Kiamili, Hollberg ja Habert
tutkimuksessaan Detailed Assessment of Embodied Carbon of HVAC Sys-
tems for a New Office Building Based on BIM [6]. Tutkimusryhmä päätyi arvi-
oinnissaan tulokseen, jossa toimistorakennuksen talotekniikan tuotesidonnai-

set ilmastovaikutukset ovat n. 183 kgCO₂e/m². Selvityksen mukaan toimistorakennuksen kaikkien tuotesidonnaisten päästöjen vaihteluväli voi olla jopa 500–1200 kgCO₂e/m², joten talotekniikan osuus tästä on n. 15–36 %. Vaihteluväli rakennusmateriaalien ilmastovaikutuksista on laaja, riippuen rakennustyyppistä ja rakennuksen käyttötarkoituksesta. Sveitsiläisen tutkimusryhmän selvittämä talotekniikan osuus on kuitenkin merkittävästi korkeampi, mitä aiemmat tutkimukset ovat aiheesta osoittaneet.

Asumisen rahoitus- ja kehittämiskeskuksen (ARA) vuonna 2018 teettämässä selvityksessä Rakennuksen elinkaaren hiilijalanjäljen pienentäminen kustanustehokkaasti vuokratilohteessa [15] ei tarkasteltavien kerrostalojen taloteknisiä järjestelmiä yksityiskohtaisesti arvioitu, mutta kaikkien rakennusmateriaalien hiilijalanjälkilaskelmissa talotekniikan osuudeksi saatiin 25–31 %. Mukana osuudessa olivat myös hissit ja aurinkopaneelit. Selvityksen tekijät epäilivät omien laskelmiensa olevan vahvasti ylimitoitettut ja aiempiin tutkimustuloksiin nojaten epäilivät todellisen talotekniikan materiaalien osuuden olevan 10–12 %:n luokkaa.

Samansuuntaisiin talotekniikan osuuksiin rakennuksen tuotesidonnaisesta hiilijalanjäljestä ovat päässeet myös kotimaiset diplomitoiden tekijät Raatikainen, Näsänen ja Torkki. Diplomityössään Asiakkaan päästöjen vähentäminen talotekniikkasuunnittelussa [16] Raatikainen päätyi laskelmissaan talotekniikan materiaalien osuuteen 10,1–15,0 % rakennuksen kokonaishiilijalanjäljestä. Ilmanvaihtokone kanavistoineen on Raatikaisen tekemän selvityksen mukaan suurin talotekniikan osa taloteknisten järjestelmien tuotesidonnaisessa hiilijalanjäljessä. Näsänen hiilijalanjälkilaskelmat diplomityössä Taloteknisten järjestelmien elinkaaren ilmastovaikutukset [17] osoittavat samansuuruista osuutta (13 %) talotekniikan tuotesidonnaiselle hiilijalanjäljelle. Torkki päätyi diplomityössään Vähähiilisen asuinrakennuksen LVI-suunnittelu [18] muita diplomityöntekijöitä pienempään osuuteen, kun laskelmat osoittivat talotekniikalle vain 7 %:n siivua rakennuksen kokonaishiilijalanjäljestä. Diplomitoiden kohdalla on kuitenkin huomioitava, että talotekniikan hiilijalanjälkeä selvitettiin tarkastelemalla toisistaan poikkeavia rakennustyyppisiä. Torkki tarkasteli asuinrakennuksen, Näsänen toimistorakennuksen ja Raatikainen päiväkodin talotekniikkaa.

Talotekniset järjestelmät koostuvat suurimmalta osin metallista ja muovista, joiden valmistamisella on suuri ilmastovaikutus. Taloteknisten järjestelmien hiilijalanjälkeä kuormittaa myös järjestelmien rajallinen käyttöikä, n. 15–30 vuotta. Rakennuksen elinkaaren aikana talotekniikasta aiheutuvia ympäristöhaittoja syntyy, kun järjestelmien osia joudutaan uusimaan, korvaamaan ja siitä syntyneitä jätteitä käsittelemään tai loppusijoittamaan. Tästä syystä esimerkiksi suunniteltaessa rakennuksen energijärjestelmää, tulisivin tarkastella sen koko elinkaaren vähähiilisyttä suhteessa rakennuksen energiatehokkuuteen ja sen tuomiin säästöihin ja/tai lisäyksiin elinkaaren aikaisessa hiilijalanjäljessä. Ideaalilanteessa rakennuksen elinkaaren päästöt olisivat pieniä rinnastettuna etuihin, jotka olisi saavutettavissa rakennuksen energiatehokkuudella. [2, s. 120–121.]

Tarkasteltaessa toimistorakennuksen talotekniikkajärjestelmien koko elinkaaren eri vaiheiden aiheuttamia tuotesidonnaisia ilmastovaikutuksia, sveitsiläisen tutkimusryhmän tekemän yksityiskohtaisen analyysin [6] mukaan taloteknisten osien uusiminen on kaikista hiili-intensiivisin vaihe (1,70 kgCO₂e/m²/vuosi). Tarvittavien talotekniikkalaitteiden valmistamisella (1,32 kgCO₂e/m²/a) ja niiden käyttämisellä (1,25 kgCO₂e/m²/a) on raportin mukaan lähestulkoon saman suuruinen ilmastovaikutus. Taloteknisistä järjestelmistä syntyvien jätteiden käsittelyn päästöt johtuvat pääasiassa eristys- sekä uusiomateriaaleista ja olivat tutkimusryhmän laskelmien mukaan hyvin pienet, vain noin 0,4 kgCO₂eq/m². Selvityksen mukaan talotekniset järjestelmät vastasivat kuitenkin koko rakennuksen käytönaikaisesta energiankulutuksesta peräti 57 %:n edestä.

3.2 hiilijalanjäljen arviointi

Talotekniikan yksityiskohtaista hiilijalanjäljen laskentaa ja elinkaariarviointia on tehty maailmanlaajuisesti vain vähän. Tarkka analyysi lämmitysjärjestelmien, ilmanvaihdon ja ilmastoinnin ympäristövaikutuksista on raskasta ja vaikeaa eri järjestelmien monimutkaisuuden ja vaihtelevien materiaalien käytön vuoksi. Yksityiskohtainen selvitys talotekniikan hiilijalanjäljestä onnistuu kuitenkin hyödyntämällä rakennuksen tietomallinnusta ja mallinnusohjelman ulkopuolisia, tuotevalmistajien laatimia tuotekohtaisia tietoja. Tämän osoittaa sveitsiläinen tutkimusryhmä Kiamili ym. raportissaan Detailed Assessment of Embodied Carbon of HVAC Systems for a New Office Building Based on BIM. [6.]

Kiamilin tutkimusryhmän selvityksessä [6] tietomallintamiseen pohjautuva tarkka analyysi antoi talotekniikan hiilijalanjäljelle kolminkertaisen ympäristövaikutuksen verrattuna sveitsiläisen insinööri- ja arkkitehtiyhdistyksen (SIA) laatimaan energiatehokkuuden tiekarttaan ja siinä esitettyihin yleisiin toimistorakennusten talotekniikkaa koskeviin hiilijalanjälkilaskelmiin. Tutkimusryhmän laskelmien mukaan talotekniikan aiheuttamat tuotesidonnaiset kasvihuonekaasupäästöt olivat $3,05 \text{ kgCO}_2\text{e/m}^2$ vuodessa, kun taas SIA:n arviot päästöille olivat $1,1 \text{ kgCO}_2\text{e/m}^2\text{/a}$. Sveitsiläinen tutkimusryhmä päätyi raportissaan suosittelemaan tietomallinnusta ja tuotetietoja hyödyntävän yksityiskohtaisen selvityksen tekemistä arvioitaessa taloteknisten järjestelmien osuutta rakennuksen hiilijalanjäljestä. Vain kaikki komponentit huomioiva tarkka analyysi voi paljastaa talotekniikan todelliset ympäristövaikutukset ja tällöin rakennuksen tuotesidonnaisten päästöjen määrä voikin osoittautua oletettua suuremmaksi.

Sveitsiläisen tutkimusryhmän tietomallinnukseen pohjautuvat tulokset herättävät myös epäilyksen siitä, aliarvioiko sveitsiläinen insinööri- ja arkkitehtiyhdistys talotekniikan osuutta rakennusten hiilijalanjäljestä. Toinen mahdollinen syy tutkimusryhmän ja SIA:n tulosten eroavaisuudelle voi olla tutkimusryhmän tarkastelunkohteena olleen toimistorakennuksen energiatehokkuuteen vaadittava runsas ja monimutkainen talotekniikkavarustelu. Raportin tulosten valossa tutkimusryhmä esittääkin, että päästöjen vähentämistä rakennuksen energiatehokkuudella tulisi aina verrata energiatehokkuuden tuoman rakennusmateriaalin aiheuttamiin ympäristövaikutuksiin. [6.]

Myös Suomessa on testattu tietomallintamiseen perustuvaa ympäristöministeriön ohjeistamaa hiilijalanjälkilaskentaa erilaisissa rakennusprojekteissa vuodesta 2019 lähtien. Näiden pilottihankkeiden yhteydessä on huomattu, että talotekniikkajärjestelmien päästölaskenta on poikkeuksellisen haastavaa. Syynä tähän ovat rakennuskohteiden taloteknisen suunnittelun ja tietomallinnuksen ajoittuminen vasta projektin urakkavaiheeseen, joten tarkkoja tietoja taloteknisten laitteiden ja järjestelmien määrästä ei hankesuunnittelun alussa tehtävään elinkaariarviointiin ole vielä saatavilla. Talotekniikkalaitteiden päästölaskenta on raskasta myös siitä syystä, että laskentaan tarvittavat tiedot on kerättävä monesta eri lähteestä ja talotekniikan sisältämien komponenttien ja osien

määrä on suuri. Päästölaskennan helpottamiseksi ympäristöministeriön ohjeistuksen mukaisessa Rakennuksen vähähiilisyyden arviointimenetelmässä talotekniikan osuutta rakennuksen hiilijalanjäljestä esitetäänkin suunta-antavilla, taulukoiduilla neliömetripohjaisilla rakennustyyppien jaotelluilla päästöker-toimilla. [19.]

Ympäristöministeriön toimeksiantona ja Sweco Talotekniikka Oy:n toteuttamana selvityshanke talotekniikan päästötiedoista kokoaa raportissaan [19] tietoa talotekniikan materiaalien osuudesta rakennusten hiilijalanjäljestä. Raportin mukaan rakennusten taloteknisten järjestelmien suuri vaihtelu eri rakennustyyppien välillä ohjaa talotekniikan hiilijalanjätkilaskentaa käytäntöön, jossa talotekniikkalaitteiden päästöt esitetään ympäristöministeriön laatiman Rakennuksen vähähiilisyyden arviointimenetelmän tavoin rakennustyyppittäin. Tarvittaessa eri rakennusten päästöarvoihin voidaan lisätä esim. jäähdytysjärjestelmästä aiheutuvat päästöt, jos rakennukseen sellainen ennakko-oletuksesta poiketen suunnitellaan.

Ympäristöministeriön arviointimenetelmän taloteknisten järjestelmien hiilijalanjäljen laskentaperusteita kartoittavassa Sweco Talotekniikka Oy:n selvityshankkeessa [19] talotekniikkaan käytettyjen materiaalien määrätiedot muutettiin tuotevalmistajien antamia tuotekohtaisia materiaalitietoja hyödyntäen laskentaa helpottaviksi materiaalipohjaisiksi massoiksi. Talotekniikan osalta hankkeessa jouduttiin tekemään yleisluontoisia oletuksia, sillä kaikista tuotteista ei tarvittavia tietoja ollut saatavilla. Oletukset perustuivat samoista materiaaleista valmistettujen tuotteiden tiheyksiin. Osa taloteknisten järjestelmien komponenteista jouduttiin myös jättämään päästölaskennan ulkopuolelle, koska laskennan pohjalla olevassa tietomallintamisessa tiettyjä talotekniikan osia, kuten lämpöpumppuja ja varaajia, esitetään tyypillisesti vain tilavarauksina. Päästölaskennan ulkopuolelle jäivät myös pienet talotekniset osat, kuten kaivot, käyttövesipumput ja erilaiset mittarit olettaen niiden osuuden olevan talotekniikan hiilijalanjäljen kokonaisuudesta pieni.

Sweco Talotekniikka Oy:n selvityshankkeessa [19] toteutetun päästölaskennan ulkopuolelle jääneet talotekniikan komponentit huomioitiin lopputuloksessa konservatiivisella kertoimella 1,2. Hiilijalanjäljen painoa lisäävän kertoim-

men tarkoituksena on laskennan ulkopuolelle jätettyjen komponenttien huomiointien lisäksi kannustaa rakennusprojektin parissa työskenteleviä toteuttamaan elinkaariarviointia yksityiskohtaisena laskelmana. Tarkka laskenta, jossa kaikki talotekniset komponentit otetaan huomioon, osoittaa rakennuksen talotekniikan hiilijalanjäljen todennäköisesti pienemmäksi kuin konservatiivista painokerrointa käytettäessä.

Sweco Talotekniikka Oy:n selvityshankkeessa talotekniikkajärjestelmien materiaalityypit ja päästömäärät laskettiin hyödyntämällä käytettyjen talotekniikkamateriaalien massamääriä ja Suomen ympäristökeskuksen (Syke) ylläpitämää päästötietokantaa eli CO₂data -palvelua [19]. Ympäristöministeriön toimeksiannosta Syke on päivittänyt ja kehittänyt vuodesta 2021 lähtien puolueetonta rakennustuotteiden tietokantaa, johon on koottu dataa mm. eri tuotteiden päästökertoimista ja ilmastovaikutuksista. Tiedot tuotteista perustuvat pääosin rakennustuotteiden ympäristöselosteisiin, joiden avulla on tehty vertailua ja laskentaa keskimääräisistä rakennustuotteiden päästöistä. [20.] Sweco Talotekniikka Oy:n selvityshankkeessa talotekniikan materiaalien päästömäärät korreloivat pitkälti taloteknisten järjestelmien massamäärien kanssa. Taloteknisten massamäärien kasvaessa myös materiaalityypit kasvoivat. Tämä johtui pääasiassa siitä, että valtaosa taloteknisten järjestelmien komponenteista, niin ilmanvaihto-, lämmitys- kuin jäähdytysjärjestelmissäkin, on valmistettu hiili-intensiivisestä teräksestä. [19.]

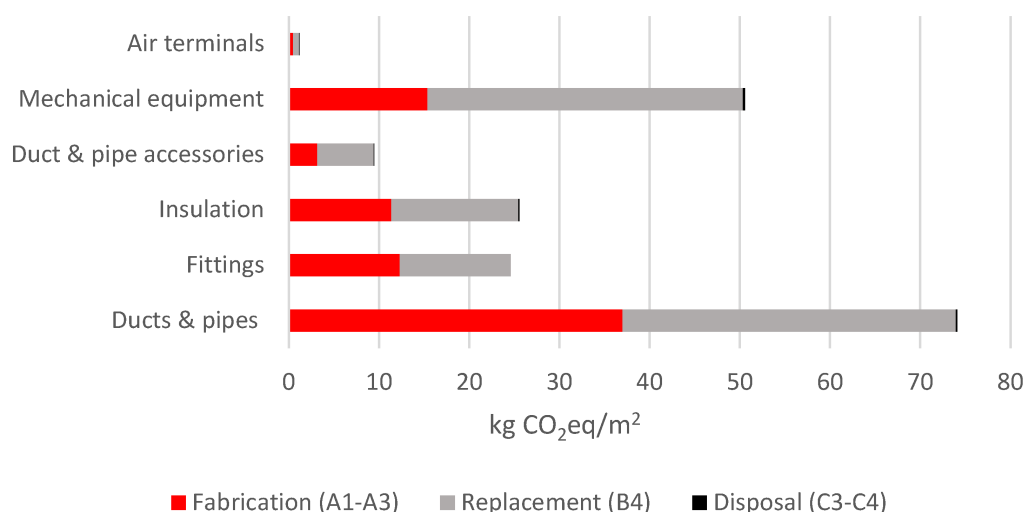
Rakennusten käyttövaiheeseen kuuluvat taloteknisten järjestelmien korjaukset ja osien vaihdosta aiheutuvat päästötiedot pohjautuivat Sweco Talotekniikka Oy:n selvityshankkeessa [19] RT-kortin tietoihin taloteknisten laitteistojen elinikäodotuksista. Selvityksen käytönaikaisia tietoja tarkennettiin alan asiantuntijoiden kokemusperäisellä tiedolla laitteiden uusimistarpeista. Huomionarvoista selvityshankkeessa oli se, että rakennustyyppi saattoi vaikuttaa talotekniikan uusimiseen, vaikka laitteistojen käyttöikä ei olisikaan vielä tullut täyteen. Esimerkiksi toimistorakennuksissa ja liiketiloissa vuokralaisten vaihtuminen tai käyttäjien vaatimukset sisäilmaston tai valaistuksen suhteen aiheuttivat talotekniikan uusimista ennen varsinaisen käyttöikänsä saavuttamista. Taloteknisten järjestelmien käytönaikaista energiankulutusta ei selvityshankkeessa huomioitu talotekniikan päästötietoihin lainkaan.

3.3 Talotekniikan tuotesidonnaiset päästöt

Kiamilin ym. tekemän selvityksen [6] mukaan yleisin materiaali talotekniikkajärjestelmissä on teräs. Sen osuus taloteknisissä järjestelmissä on noin 80 %, ja terästä sisältävät pääasiassa vesi- ja lämmityspotket sekä ilmanvaihtokanavat. Materiaalitiedon merkitys korostuu, kun tarkastellaan rakennuksen elinkaarta ja otetaan huomioon talotekniikkalaitteiden uusimisen tarve rakennuksen koko elinkaaren aikana. Esimerkiksi lämpöpumpun käyttöiän ollessa n. 20 vuotta, on se uusittava rakennuksen laskennallisen 60 vuoden elinkaaren aikana kahdesti. Kertautuva materiaalmäärä kaksinkertaistaa myös lämpöpumpun aiheuttaman käytönaikaisen ympäristövaikutuksen verrattuna sen alkuperäisen lämpöpumpun valmistamisesta aiheutuviin vaikutuksiin. Materiaalin määrällä on siis välitön vaikutus talotekniikan aiheuttamaan kokonaishiilijalanjälkeen.

Sveitsiläistutkimuksen mukaan [6] mekaaniset laitteet, ilmanvaihtokanavat ja putket ovat pääasiallisesti vastuussa talotekniikkajärjestelmien aiheuttamista tuotesidonnaisista kasvihuonekaasupäästöistä (kuva 2). Tutkimuksessa huomio kiinnittyi kuitenkin myös mekaanisiin laitteisiin kuuluvien ilmanvaihtolaitteiden suodattimien aiheuttamaan ympäristövaikutukseen. Ilmansuodattimet on valmistajan ohjeiden mukaisesti vaihdettava vähintään kerran vuodessa, joten rakennuksen 60 vuotisen elinkaaren aikana suodattimien määrä on jo huomattava. Suodattimien osuus ilmanvaihtolaitteen osien uusimisesta aiheutuvista päästöistä on n. 65 % ja tarkasteltaessa rakennuksen talotekniikkaa kokonaisuutena, suodattimien käytönaikaiset vaikutukset osien uusimisen osuudesta ovat n. 11 %. Näiden lukujen valossa sveitsiläistutkimus esittää, että aiemmin toteutetuista elinkaariarvioinneista poiketen, ilmansuodattimien osuus talotekniikan hiilijalanjäljestä on huomionarvoinen erityisesti suurissa kauppa- ja toimistorakennuksissa, joissa massiiviset ilmanvaihtolaitteet ovat tyypillisiä.

Climate change impact for the assessed HVAC categories



Kuva 2. Talotekniikkajärjestelmien tuotesidonnaiset kasvihuonekaasupäästöt sveitsiläisessä toimistorakennuksessa [6]

Kiamili ym. päätyvät tutkimuksessaan [6] tuloksiin, joiden mukaan taloteknisistä laitteista suurin tuotesidonnainen ilmastovaikutus on kattoasenteisilla säteilypaneelilla (23,2 kgCO₂e/m²). Lähes yhtä suuri ilmastovaikutus on suurilla ilmanvaihtokoneilla (21,9 kgCO₂e/m²). Muiden lämmitykseen ja ilmanvaihtoon liittyvien laitteiden yhteenlasketut päästöt ovat jopa 95–99 % pienemmät. Tutkimuksessa huomionarvoista on myös se, että yhden jäähdytyskonvektorin ilmastovaikutus (1,32 kgCO₂e/m²) on samaa suuruusluokkaa kuin 18 pienen lämpöpumpun vaikutukset (yht. 1,62 kgCO₂e/m²). Laskelmien mukaan ilmanvaihdon päätelaitteiden ilmastovaikutukset ovat puolestaan minimaalisia, riippumatta päätelaitteen mallista. Putki- ja ilmastointikanavia keskenään vertailtaessa kanaviston ilmastovaikutukset osoittautuivat putkistoa kolme kertaa suuremmiksi. Tämä johtuu puhtaasti ilmanvaihtokanaviston sisältämästä suuremmasta materiaalmäärästä. Putkiston osista suurin ilmastovaikutus on sveitsiläistutkimuksen mukaan sulkuläppäventtiileillä (1,38 kgCO₂e/m²). [6.]

Ympäristöministeriön määrittämää vähähiilisuuden arviointimenetelmää viitoittavassa Sweco Talotekniikka Oy:n selvityshankkeessa tarkastelun kohteena olleiden rakennusten talotekniikan materiaalisidonnaiset ja käytönaikaiset korjauksista aiheutuvat päästömäärät vaihtelivat suuresti eri rakennustyyppien välillä. Laskelmien mukaiset materiaali- ja käytönaikaiset päästöt olivat 42–79 kgCO₂/m² ja käytönaikaiset

tönaikaisina 10–96 kgCO₂/m². Vaihtelusta huolimatta kaikkien rakennustyyppien suurimmasta taloteknisestä materiaalipäästöstä vastasi ilmanvaihtojärjestelmä. Ilmanvaihdon ratkaisuihin ja materiaaleihin tulisikin tästä syystä kiinnittää erityistä huomiota. [19.]

3.4 Rakennuksen käyttösidonnaiset päästöt

Rakennuksen käyttösidonnaiset päästöt syntyvät pääasiassa energiankulutuksesta, jota tarvitaan haluttujen toimintojen ja olosuhteiden ylläpitämiseen rakennuksessa. Käyttösidonnaisia kasvihuonekaasupäästöjä aiheutuu sähkön ja lämmön käytöstä. [2, s. 40.] Sähkön ja lämmön hyödyntämiseen vaadittavan energian valmistamiseen käytetty polttoaine on ratkaiseva tekijä päästöjen syntymiselle, sillä eri polttoaineilla on erilainen päästövaikutus. Suurin osa polttoaineiden päästöistä syntyy varsinaisessa polttoprosessissa, mutta myös polttoaineen valmistaminen ja sen tuotantoketjun vaatimat toimintaprosessit aiheuttavat osan energian kulutuksesta aiheutuvista käyttösidonnaisista päästöistä. Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy:n vuonna 2018 tuottaman selvityksen mukaan sähkön ja lämmön tuotantoon käytettävistä polttoaineista ilmaston näkökulmasta pahin kasvihuonekaasupäästöjen aiheuttaja on turve (114,8 gCO₂e/MJ). Toiseksi huonoin vaihtoehto on kivihiihi (109,2 gCO₂e/MJ) ja kolmanneksi öljy jalosteineen (85,8–89 gCO₂e/MJ). Maakaasu eri olomuodoissa on ilmaston kannalta seuraavaksi huonoin energianlähde. [21.]

Kasvihuonekaasupäästöjä aiheuttavat myös sähkö- ja lämpöenergian valmistamiseen käytettävät biopohjaiset polttoaineet, kuten puu, biodiesel, biokaasu ja yhdyskuntajätteet. Niiden polttaminen synnyttää päästöjä siinä missä fossiilisetkin polttoaineet, mutta hiilineutraaliuden kriteereiden mukaisesti biopohjaisten polttoaineiden päästöt voidaan jättää huomioimatta poltettavan biomassan aiemmin sitomansa hiilidioksidin vuoksi. Fossiilisten ja biopohjaisten polttoaineiden suhteellinen käyttö lämmitysenergian valmistuksessa vaikuttaa mm. siihen, kuinka paljon päästöjä aiheutuu rakennuksesta, jonka lämmitysjärjestelmänä toimii kaukolämpö. Uusiutuvilla energianlähteillä tuotettu sähkö ei sekään ole täysin päästötöntä, vaikka aurinko-, tuuli- ja vesivoima sellaisiksi mielletäänkin. Päästöjä syntyy mm. aurinkopaneelien, tuulivoimaloiden ja keräimien valmistamisesta, mutta päästöjen laskennallinen määrä on häviävän

pieni verrattuna esimerkiksi fossiilisista polttoaineista syntyviin kasvihuonekaasupäästöihin. [2, s. 45–46.]

Erilaiset energianlähteet vaikuttavat merkittävästi sähkön ja kaukolämmön päästöihin ja sitä kautta rakennuksen hiilijalanjälkeen. Rakennuksen elinkaariarviota tehdessä olisikin perusteltua selvittää energiantuotantoon käytettyjen polttoaineiden laatu. [2, s. 46.] Ympäristöministeriön vuoden 2021 julkaisussa *Purkaa vai korjata?* tuodaan esille kaukolämmön vaihtoehdoksi usein esitetyn maalämpöjärjestelmän hyödyt. Sen mukaan maalämmöllä lämpiävä uudisrakennus aiheuttaa peräti 70 % vähemmän päästöjä kuin kaukolämpöön liitetty peruskorjattu rakennus. Samansuuntaiseen lopputulokseen päädytään Asumisen rahoitus- ja kehittämiskeskuksen (ARA) vuoden 2018 raportissa [15] Rakennuksen elinkaaren hiilijalanjäljen pienentäminen kustannustehokkaasti vuokratalokohteessa. Sen mukaan maalämmön kasvihuonekaasupäästöt ovat lähes 50 % pienemmät kaukolämpöön verrattuna, kun tarkastelujaksona on kerrostaloasunnon 60-vuotinen elinkaari.

3.5 Keinoja talotekniikan hiilijalanjäljen pienentämiseksi

Käytössä olevat ratkaisut energian säästämiseksi rakennusten ylläpidossa, rakentamisessa ja rakennusmateriaalien tuotannon prosesseissa sekä rakennusten pitkät käyttöiät ja monikäyttöisyys mahdollistavat rakennussektorilla vain osittaisen päästöjen leikkaamisen. Näiden menetelmien lisäksi radikaaleille toimenpiteille on tarvetta. Rakentamisen kiertotalous, uusiutuviin energiamuotoihin siirtyminen ja kehittyvä teknologia luovat jatkuvasti mahdollisuuksia tehostaa rakennusten hiilidioksidipäästöjen ja ilmastovaikutusten vähentämistä. [2, s. 19–20.]

Sweco Talotekniikka Oy:n selvityshankkeen [19] mukaan talotekniikan tuotesidonnaisiin päästöihin olisi mahdollista vaikuttaa vähentävästi mm. suosimalla keskitettyä ilmanvaihtojärjestelmää, pitkäikäisiä, kevyitä sekä vähäpäästöisiä tuotteita, laitteita ja materiaaleja. ARA:n raportti *Rakennuksen elinkaaren hiilijalanjäljen pienentäminen kustannustehokkaasti vuokratalokohteessa* [15] esittää puolestaan kerrostalon talotekniikan hiilijalanjäljen pienentämiseksi hajautettua, huoneistokohtaista ilmanvaihtoa sen tarpeenmukaisen ohjauksen ja

keskitettyä ilmanvaihtoa energiatehokkaamman käytettävyyden vuoksi. Tämän lisäksi ilmanvaihdossa on huomioitava suomalaisten määräysten ohjeistus uudisrakennuksille, jossa ilmanvaihdosta talteen otettavalla lämmöllä on katettava vähintään 55 % uudisrakennuksen ilmanvaihdon vaatimasta lämmitysenergiasta. Sweco Talotekniikka Oy:n ja ARA:n selvityksissä näkökulmat vaikutuskeinoihin ovat erilaiset: Sweco Talotekniikka Oy:n tutkimus keskittyy tuotesidonnaisten päästöjen vähentämiseen ja ARA käytönaikaisen hiilijalanjäljen pienentämiseen energian kulutuksen kautta.

ARA:n selvitys [15] esittää myös yhdeksi tehokkaimmaksi rakennuksen päästövähennyskeinoksi maalämmön suosimisen kaukolämmön sijaan. Ilmanvaihdon lämmöntalteenoton lisäksi lämmöntalteenotto jätevedestä esitetään selvityksessä keinona vaikuttaa rakennuksen energiankäyttöön. Myös vesiputkien ja putkiston osien hyvä eristäminen auttavat pienentämään rakennuksen talotekniikan hiilijalanjälkeä parantamalla taloteknisten järjestelmien energiatehokkuutta.

4 ILMASTOVAIKUTUSTEN ARVIOINTI

4.1 Rakennuksen vähähiilisuuden arviointimenetelmä

Suomen ympäristöministeriön vuonna 2019 kehittämä Rakennuksen vähähiilisuuden arviointimenetelmä rakennusten elinkaariarviointiin ja hiilijalanjälkilaskentaan pohjautuu Euroopan komission Level(s)-menetelmään ja eurooppalaiseen kestävästä rakentamisesta ohjaaviin standardeihin (mm. EN-15978 ja EN-15643-sarja). Arviointimenetelmä on kehitetty hiilijalanjäljen arviointiin sekä uudis- että korjausrakentamisessa ja sen arviointijakso rakennuksen elinkaarelle on 50 vuotta. Menetelmän avulla on mahdollista arvioida myös rakennuksen hiilikädenjälkeä. [22.] Arviointimenetelmän testausjakso ajoittui vuosiin 2019–2020, jonka jälkeen siihen tehtiin pieniä muutoksia ja tarkennuksia. Päivitetty versio oli lausuntokierroksella v. 2021. Menetelmän lopullinen versio julkaistaan, kun uuden rakentamislain tueksi laadittava asetus rakennuksen vähähiilisuuden arvioinnista astuu voimaan. [10.]

Rakennuksen vähähiilisuuden arviointimenetelmässä taloteknisten järjestelmien päästötiedot on ilmoitettu neliömetrikohtaisina suhteessa lämmitettyä

huonealaa kohti. Arviointimenetelmää varten tehdyt talotekniikan massa-arviot pohjautuvat VTT:n vuonna 2013 tekemään taustaraporttiin Rakennusmateriaalien ympäristövaikutukset. Siinä esitetyt esimerkkirakennuksena toimineen uuden asuinkerrostalon elinkaarenaikaiset tuotesidonnaiset päästöt olivat laskelmien mukaan yhteensä 955 tCO₂e, mutta arvion vaihteluväli oli 530–1 265 tCO₂e. Raportissa talotekniikan osuudeksi on arvioitu 31 tCO₂e vaihteluvälillä +/- 25 % eli 23–38 tCO₂e. Kun esimerkkirakennuksen 50 vuoden elinkaaren aikana joudutaan korjaamaan osia ja lopulta purkamaan koko rakennus, on taustaraportin mukaan rakennuksen tuotesidonnaiset kasvihuonekaasupäästöt yhteensä 1 476 tCO₂e (vaihteluväli 881–1 964 tCO₂e). [23.]

Rakennuksen energiankulutuksen hiilijalanjäljen arviointi onnistuu ympäristöministeriön arviointimenetelmällä energiantuotannon polttoaineiden vakioiduilla päästökertoimilla. Sähkö- ja lämmitysenergian valmistamiseen käytetyillä energiamuodoilla on arviointimenetelmässä omat päästökertoimensa, joissa on huomioitu arviointijakson (50 v.) aikana tapahtuva kansallinen siirtymä uusiutuvaan energiantuotantoon (taulukko 1).

Taulukko 1. Energiamuotojen päästökertoimet gCO₂/kWh [22]

	2020	2030	2040	2050	2060	2070	2080	2090	2100	2110	2120
Sähkö	121	57	30	18	14	7	4	2	1	1	0
Kaukolämpö	130	93	63	37	33	22	15	10	7	4	3
Kaukojäähdytys	130	93	63	37	33	22	15	10	7	4	3
Fossiiliset polttoaineet	260	260	260	260	260	260	260	260	260	260	260
Uusiutuvat polttoaineet	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Arviointimenetelmässä energian tuottamat hiilidioksidin ominaispäästöt vastaavat keskimääräistä vuotuista tuotantoa. Kaikki uusiutuvat polttoaineet, myös biopolttoaineet, saavat menetelmässä päästökertoimeksi 0 gCO₂/kWh, kun taas fossiilisten polttoaineiden päästökerroin on aina 260 gCO₂/kWh. Kaukolämmön päästökerroin pienenee arviointimenetelmässä siten, että esim. vuonna 2020 kerroin on 130 gCO₂/kWh, v. 2060 33 gCO₂/kWh ja v. 2100 7 gCO₂/kWh. Kertoimessa on siis huomioitu kaukolämmöntuotannon siirtyminen uusiutuviin energianlähteisiin seuraavan sadan vuoden aikana. [22.]

4.2 One Click LCA -laskentaohjelma

Tässä opinnäytetyössä opetusrakennusten talotekniikan hiilijalanjäljen laskenta on toteutettu käyttäen Suomen ympäristöministeriön laatimaa vuoden 2021 versiota Rakennuksen vähähiilisyyden arviointimenetelmästä. Arviointimenetelmää hyödyntävä varsinainen hiilijalanjäljen laskenta on suoritettu One Click LCA (Life Cycle Assessment) -ohjelmalla käyttäen Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulun opetuslisenssiä. Kaupallinen One Click LCA -laskentaohjelma [24] on Bionovan kehittämä verkkopohjainen, EN- ja ISO-standardeja (mm. EN-15978 ja ISO-21930) sekä kansainvälisiä ympäristösertifikaatteja tukeva rakennusten ja infrastruktuurin käyttöön suunniteltu ympäristö- ja elinkaariarviointiohjelmisto.

One Click LCA:n materiaalitietokannan päästötiedot perustuvat standardin EN-15804 mukaisiin ympäristöselosteisiin. Ohjelmistolla on mahdollista laskea rakennuksen hiilijalanjälki käyttäen valittua arviointimenetelmää. Erilaisia hiilijalanjäljen arviointiin kehitettyjä menetelmiä laskentaohjelmasta löytyy useita. Ympäristöministeriön version lisäksi mm. Green Building Council Finland ry:n arviointimenetelmä Buildings Performance Metrics sekä kansainvälisten ympäristösertifikaattien mukaiset arviointikriteerit Building Research Establishment Environmental Assessment Method (BREEAM) ja Leadership in Energy and Environmental Design (LEED) löytyvät One Click LCA -ohjelman arviointimenetelmävalikoimasta. [24.]

5 OPETUSRAKENNUKSEN HIILIJALANJÄLJEN SELVITYS

Sweco Talotekniikka Oy:n toteuttamassa Talotekniikan päästötietojen selvityshankkeessa [19] arvio suomalaisen opetusrakennuksen talotekniikan sisällöstä ja massamäärästä on laadittu hankkeen tutkimuskohteena olleiden muiden rakennustyyppien pohjalta. Selvityksessä opetusrakennusten talotekniikan arvioitiin vastaavan toimistorakennusten varustelua. Selvityksen linjausta noudattaen myös tässä opinnäytetyössä on rinnastettu opetusrakennukset toimistorakennuksiin tilojen samankaltaisen käytettävyyden ja käyttöasteen vuoksi. Opinnäytetyön kirjallisuuskatsauksessa on keskitytty opetusrakennuksia koskevan tutkimustiedon puutteessa toimistorakennuksia käsittelevään tutkimustietoon.

5.1 Laskennan kohteet

Opinnäytetyössä toteutetun talotekniikan hiilijalanjäljen laskennan kohteina toimivat Lohjan kaupungin 3 peruskoulurakennusta. Kaikista tarkastelun kohteena toimivista opetusrakennuksista on laadittu vuoden 2018 mukainen energiatodistus. Kooste energiatodistuksesta on julkinen ja se löytyy www.energiatodistusrekisteri.fi-sivustolta. Lohjalaiset peruskoulut ovat Sammatin koulu, Karjalohjan koulu ja Järnefeltin yhtenäiskoulu (taulukko 2).

Taulukko 2. Hiilijalanjälkilaskennan kohteet

Peruskoulu	Sammatin koulu	Karjalohjan koulu	Järnefeltin yhtenäiskoulu
Lämmitysjärjestelmä	Kaukolämpö	Öljy	Kaukolämpö
Lämmitetty nettopinta-ala n-m ²	2 894	1 576	6 190
Vakioitu, laskennallinen ostoenergian määrä sähkölle kWh/a	141 603	111 347	253 796
Sähkön kulutus kWh/n-m ² /a	49	71	41
Vakioitu, laskennallinen ostoenergian määrä lämmitykselle kWh/a	365 423	318 462	439 940
Lämmityksen kulutus kWh/n-m ² /a	126	202	71
Energiatehokkuusluokka	B	E	A

Sammatin koulu toimii vuonna 1954 valmistuneessa opetusrakennuksessa, jota on laajennettu vuonna 2014. Rakennuksessa on 3 kerrosta, joista alimmainen sijaitsee osittain maan alla. Sammatin koulun lämmitetty nettoala on 2 894,0 m² ja lämmitysjärjestelmänä toimii kaukolämpö. Rakennuksen lämmönjako tapahtuu vesikiertoisten pattereiden avulla ja ilmanvaihtojärjestelmä on toteutettu koneellisella tulo- ja poistoilmanvaihdolla, joka on varustettu lämmöntalteenotolla. Sammatin koulun energiatodistuksen mukainen vakioitu, laskennallinen ostoenergian määrä sähkölle on 141 603 kWh/vuosi ja kaukolämmölle 365 423 kWh/vuosi. Todistuksen mukaan kaukolämmön kulutus nettoneliötä kohden on 126 kWh/n-m²/a ja sähkön kulutuksen osalta 49 kWh/n-m²a. [25.] Sammatin koulun energiatehokkuusluokka on B eli koulu on tässä opinnäytetyössä vertailtavista opetusrakennuksista toiseksi energiatehokkain.

Karjalohjan koulu sijaitsee vuonna 1952 valmistuneessa rakennuksessa. Koulurakennuksen tiloja on uudistettu vuonna 2017. Karjalohjan koulun yhteydessä toimivat myös paikallinen kirjasto ja liikuntahalli. Rakennuksessa on 3

kerrosta, joista alimmainen sijaitsee osittain maan alla. Karjalohjan koulun lämmitetty nettoala on 1 576,0 m² ja lämmitysmuotona on öljy. Koulurakennuksen lämmönjako on toteutettu vesikiertoisilla pattereilla ja ilmanvaihtojärjestelmänä on koneellinen tulo- ja poistoilmanvaihto. Ilmanvaihtokone on varustettu myös lämmöntalteenotolla. Energiatodistuksen mukaan Karjalohjan koulun vuosittainen vakioitu, laskennallinen ostoenergian määrä sähkölle on 111 347 kWh ja öljylle 318 462 kWh. Karjalohjan koulun energiatehokkuusluokka on E. Öljylämmityksen kulutus on energiatodistuksen mukaan Karjalohjan koulussa 202 kWh/n-m²/a ja sähkön kulutus 71 kWh/n-m²/a. [26.] Vertailtavista opetusrakennuksista Karjalohjan koulun energiatehokkuus on heikoin.

Järnefeltin yhtenäiskoulun opetusrakennus on valmistunut vuonna 2022. Rakennuksessa on 2 kerrosta ja lämmitettävää nettoalaa 6 190,0 m². Lämmitysjärjestelmänä toimii kaukolämpö ja lämmönjako on toteutettu vesikiertoisella lattialämmityksellä. Ilmanvaihdosta vastaa LTO:lla varustettu koneellinen tulo- ja poistoilmanvaihto. Järnefeltin yhtenäiskoulun vuosittainen vakioitu, laskennallinen ostoenergian määrä on energiatodistuksen mukaan sähkölle 253 796 kWh ja kaukolämmölle 439 940 kWh. Energiatehokkuusluokka on A. Todistuksen mukaan kaukolämmön kulutus on Järnefeltin yhtenäiskoulussa 71 kWh/n-m²/a ja sähkön kulutus 41 kWh/n-m²/a. [27.] Järnefeltin yhtenäiskoulu on tässä opinnäytetyössä vertailtavista opetusrakennuksista kaikkein energiatehokkain.

5.2 Hiilijalanjäljen laskenta

Tässä opinnäytetyössä toteutettu talotekniikan hiilijalanjälkilaskenta pohjautuu ympäristöministeriön laatimaan Rakennuksen vähähiilisyyden arviointimenetelmään. Käytössä on Ympäristöministeriön arviointimenetelmän päivitetty versio vuodelta 2021, joka löytyy laskentaohjelma One Click LCA:n arviointimenetelmävalikoimasta. Laskenta on tehty hyödyntäen One Click LCA:n Carbon Designer -lisäosaa, joka mahdollistaa elinkaariarvioinnin toteuttamisen ilman tarkkoja tietoja rakennuksessa käytetyistä tai käytettävistä materiaaleista. Carbon Designer hyödyntää rakennusmateriaalien oletusarvoja rakennustyyppin, kokonaispinta-alan ja kerroslukumäärän pohjalta. Tämän lisäominaisuuden ansiosta esimerkiksi erilaisia toteutusvaihtoehtoja voidaan vertailla ja tarkastella jo rakennuksen hankesuunnitteluvaiheessa. [24].

Carbon designer -lisäosalla on mahdollista keskittyä tarkastelemaan pelkän talotekniikan osuutta rakennuksen hiilijalanjäljestä, kun laskentaohjelmaan on ensin määritelty rakennuksen tyyppi, bruttoala ja maanpäällisten kerrosten lukumäärä. One Click LCA -ohjelman käyttämät oletusarvot ovat ympäristöministeriön arviointimenetelmän mukaisesti määritetty suomalaiselle, peruskouluopetukseen käytettävälle tyypirakennukselle. Carbon Designer -lisäosaan on näiden rakennuksen perustietojen lisäksi määriteltävä myös laskentajakson pituus, joka tässä opinnäytetyössä on käytettävän arviointimenetelmän mukaisesti 50 vuotta. Määriteltyjen alkutietojen pohjalta ohjelma laskee rakennukselle perustason, jonka lisäksi rakennuksen hiilijalanjäljessä huomioitaviin tietoihin on mahdollista syöttää tarkennuksia, kuten perustuksia ja muita rakenteita koskevia materiaalitietoja.

Tässä opinnäytetyössä laskennan kohteina olleiden opetusrakennusten oletusarvojen pohjalle koottuihin perustasontietoihin lisättiin laskennassa huomioitavaksi opetusrakennukseen kuuluvan talotekniikan neliömetripohjainen keskiarvo, joka on määritelty arviointimenetelmään Suomen ympäristöministeriön toimesta. Myös tiedot rakennuksen vuotuisesta sähköenergian, polttoaineen tai kaukolämmön kulutuksesta syötettiin laskentaohjelmaan. Sekä sähköenergian että kaukolämmön päästöjen laskentaa varten valittiin One Click LCA -ohjelmiston tarjoamista vaihtoehdoista 50 vuoden ajanjaksolle määritelty hyödynjakomenetelmä. Karjalohjan koulun lämmitykseen käytettävä öljy huomioitiin laskennassa ilmoittamalla tiedot fossiilisen polttoaineen käytöstä rakennuksen erillislämmityksessä.

Laskentaohjelmaan syötettyjen tietojen pohjalta One Click LCA -ohjelma arvioi opetusrakennusten talotekniikan hiilijalanjäljen 50 vuoden elinkaaren ajalle. Laskennan arvio hiilijalanjäljestä pitää sisällään kaikki rakennuksen elinkaaren vaiheet (moduulit A-C), pois lukien rakennuksen kierrätys- ja hyödyntämisvaiheen (vaihe D). Myös rakennusten mahdollinen positiivinen ilmastovaikutus eli niin sanottu hiilikädenjälki, esim. uusiutuvan energiantuotannon muodossa, on jätetty laskennassa huomioimatta.

5.3 Kirjallisuuskatsaus

Opinnäytetyön teoriaosuudessa esitetyt teokset ja tutkimukset koskien talotekniikan hiilijalanjälkeä käsittelevät aihetta niin energiankulutuksen kuin tuotesidonnaisten päästöjenkin näkökulmasta. Laajaa ja moniulotteista ilmastonmuutosta koskevan opinnäytetyön aiheen vuoksi kirjallisuuskatsauksessa on keskitytty rakentamisen negatiivisiin ilmastovaikutuksiin ja hiilijalanjälkeen rajaten esim. rakentamisen hiilikädenjälkeä koskevat tutkimukset pois opinnäytetyössä tarkasteltavista aineistoista. Kirjallisuuskatsaukseen valitut teokset ja tutkimukset ovat löytyneet verkkosivustojen kautta hyödyntäen erilaisia hakuohjelmia, kuten Science Direct-, Suomen ympäristöministeriön julkaisut- sekä valtioneuvoston julkaisut -sivustoja.

Kirjallisuuskatsauksen tutkimuksia haettaessa hakusanoina on käytetty muun muassa asiasanoja Building Technology, HVAC, Carbon Footprint, Educational Building, Talotekniikka, vähähiilinen rakentaminen ja hiilijalanjälki. Kirjallisuuskatsauksen tutkimusaineisto koostuu sekä kotimaisista että kansainvälisistä tutkimuksista. Aineistossa on mukana niin julkisen toimialan (ympäristöministeriö, ARA) julkaisemia selvityksiä kuin YAMK- ja diplomitöitäkin.

6 TULOKSET

Kirjallisuuskatsauksen tutkimusaineistossa energiankäyttö vastaa suurimmasta talotekniikan osuudesta rakennusten hiilijalanjäljessä. Tutkimusten arviot energiankäytön päästöistä vaihtelevat 22–68 %:n välillä (taulukko 3). Rakennusten energiankäytön aiheuttamiin ilmastovaikutuksiin on kirjallisuuskatsauksen aineiston pohjalta tehokkainta vaikuttaa parantamalla rakennuksen energiatehokkuutta ja suosimalla uusiutuvia energianlähteitä. Taloteknisistä ratkaisuista erityisesti lämmitys- ja ilmanvaihtojärjestelmän merkitys korostuu tarkastelluissa tutkimuksissa. Hybridimuotoinen maalämpöjärjestelmä, aurinkopaneelit, energiatehokas ilmanvaihtokone lämmöntalteenotolla sekä hajautettu ilmanvaihto auttavat edistämään rakennusten energiankulutuksen vähähiilisyyttä.

Taulukko 3. Kirjallisuuskatsauksen tutkimuksia tuloksineen

Tutkimus	Kiamili ym: Detailed Assessment of Embodied Carbon of HVAC Systems for a New Office Building on BIM	ARA: Rakennuksen elinkaaren hiilijalanjäljen pienentäminen kustannustehokkaasti vuokratilakohteessa	Raatikainen: Asiakkaan päästöjen vähentäminen talotekniikkasuunnittelussa	Näsänen: Taloteknisten järjestelmien elinkaaren ilmastovaikutukset	Torkki: Vähähiilisen asuinrakennuksen LVI-suunnittelu	Swego Talotekniikka Oy: Talotekniikan päästötietojen selvityshanke
Vuosi	2020	2018	2021	2021	2021	2021
Tutkimuskohteen rakennustyyppi	toimisto	asuin kerrostalo	päiväkoti	toimisto	asuin kerrostalo	toimisto, kaupakeskus, opetusrakennus, majoitusliike, asuin kerrostalo
Talotekniikan tutkimuskohde	Energiankäytön päästöt, materiaalisidonnaiset päästöt	Energiankäytön päästöt, materiaalisidonnaiset päästöt	Energiankäytön päästöt, materiaalisidonnaiset päästöt	Energiankäytön päästöt, materiaalisidonnaiset päästöt	Energiankäytön päästöt, materiaalisidonnaiset päästöt	Materiaalisidonnaiset päästöt, käytönajan päästöt (pl. energiankäyttö)
Talotekniikan osuus rakennuksen hiilijalanjäljestä	Energiankäytön päästöt 57 %, materiaalisidonnaiset päästöt 15-36 % (3,05 kgCO ₂ e/m ² /a)	Energiankäytön päästöt 62,68 %, materiaalisidonnaiset päästöt 25-31 % (10-12 %)	Energiankäytön päästöt 22,741,5 %, materiaalisidonnaiset päästöt 10,1-15,0 %	Energiankäytön päästöt 100 kgCO ₂ e/brutto-m ² /50v, materiaalisidonnaiset päästöt 13 % (120 kgCO ₂ e/brutto-m ² / 50v)	Energiankäytön päästöt 22 %, materiaalisidonnaiset päästöt 7 %	Materiaalisidonnaiset päästöt 42-79 kgCO ₂ e/m ² , käytönajan päästöt 10-96 kgCO ₂ e/m ²
Talotekniikan hiilijalanjäljen vaikuttavin tekijä	IV-laitteet ja -kanavisto, putket (materiaali)	Lämmitysjärjestelmän energiatehokkuus ja energianlähteet, ilmanvaihto (energia)	Lämmitysjärjestelmä (energia), ilmanvaihtojärjestelmä (materiaali)	Terästuotteet (materiaali)	-	Ilmanvaihtojärjestelmä (materiaali)
Ehdotus hiilijalanjäljen pienentämiseksi	-	Energiatehokkuutta parantavat toimenpiteet, uusituvan energian lähteet, hajautettu ilmanvaihto lämmöntalteenotolla	Hybridimaalämpöjärjestelmä, materiaalien kierrätys (esim. teräs)	Hybridimaalämpöjärjestelmä, järjestelmien pitkä käyttöikä, lattialämmitys, vähemmän hiili-intensiivinen putkimateriaali	Vakiopaineventtiilin käyttö, lattialämmitys, energiatehokas IV-kone, aurinkopaneelit	Keskitetty ilmanvaihtojärjestelmä, järjestelmien pitkä käyttöikä, vähäpäästöiset ja kevyet tuotteet

Talotekniikan materiaalisidonnaiset päästöt vaihtelevat tutkimusaineiston mukaan 7–36 %:n välillä. Ilmaston lämpenemispotentiaalin yksikössä esitetyt arviot eri rakennustyyppien talotekniikan tuotesidonnaisista päästöistä eivät selälaisenaan ole vertailukelpoisia keskenään tutkimuksissa käytettyjen eri pintaalamääreiden vuoksi. Esim. sveitsiläisen tutkimusryhmän [6] materiaalisidonnaisen päästöjen määrä on ilmaistu suhteessa neliometriä kohden, kun taas esim. Näsänen diplomityössä materiaalisidonnaiset päästöt on ilmaistu rakennuksen bruttoneliötä kohden.

Talotekniikan materiaalisidonnaiseen hiilijalanjälkeen vaikuttaa tutkimusaineiston perusteella eniten ilmanvaihtojärjestelmä ja sen sisältämät materiaalit, erityisesti teräs. Taloteknisten järjestelmien tuotesidonnaisen päästöjen vähentämiseksi kirjallisuuskatsauksen aineistosta löytyy myös useampia ehdotuksia. Taloteknisten järjestelmien pitkä käyttöikä sekä kierrätysmateriaalien ja vähemmän hiili-intensiivisten tuotteiden suosiminen auttavat pienentämään talotekniikan osuutta rakennuksen kokonaishiilijalanjäljestä.

Opinnäytetyön kvantitatiivisen osuuden hiilijalanjälkilaskenta on toteutettu One Click LCA -laskentaohjelmalla. Suomen ympäristöministeriön Rakennuksen vähähiilisyden arviointimenetelmän mukaisen hiilijalanjälkilaskennan tulokset opetusrakennusten talotekniikan materiaali- ja käyttösidonnaisista kokonaispäästöistä vaihtelevat välillä 9,24–67,93 kgCO₂e/m²/a. Pelkän käytön aikaisen

energiankulutuksen päästöt ovat tulosten mukaan 7,32–66,01 kgCO₂e/m²/a. Energiankulutuksesta aiheutuviin päästöihin lukeutuvat sekä sähkön että lämmityksen tuotannon päästöt. Pinta-aloiltaan toisistaan poikkeavien koulurakennusten 50 vuoden elinkaaren aikaiset talotekniikan kokonaispäästöt ovat yhteensä 1 955–5 353 tCO₂e (taulukko 4).

Taulukko 4. Opetusrakennusten talotekniikan hiilijalanjälki

Peruskoulu	Sammatin koulu	Karjalohjan koulu	Järnefeltin yhtenäiskoulu
Lämmitetty nettopinta-ala n-m ²	2 894	1 576	6 190
Lämmityksen päästöt kgCO ₂ e/m ² /a	8,70	61,83	4,90
Sähkönkulutuksen päästöt kgCO ₂ e/m ² /a	2,89	4,17	2,42
Energiankulutuksen kokonaispäästöt kgCO ₂ e/m ² /a	11,59	66,01	7,32
Taloteknisten järjestelmien materiaalisidonnaiset päästöt kgCO ₂ e/m ² /a	1,92	1,92	1,92
Talotekniikan materiaali- ja käytönaikaiset päästöt kgCO ₂ e/m ² /a	13,51	67,93	9,24
Talotekniikan kokonaispäästöt 50 vuoden elinkaaren ajalta kgCO ₂ e/m ²	676	3 397	462
Talotekniikan kokonaispäästöt 50 vuoden elinkaaren ajalta tCO ₂ e	1 955	5 353	2 860

Sammatin koulurakennuksen talotekniikan ja energiankulutuksen kokonaishiilijalanjälki on tutkimustulosten mukaan 13,51 kgCO₂e/m²/a. 50 vuoden elinkaaren aikana talotekniikan hiilijalanjälki on siis 676 kgCO₂e/m². Sammatin koulun kokoisessa opetusrakennuksessa se tekee yhteensä 1 955 tCO₂e. Tästä energiankulutuksen, eli sähkön ja kaukolämmön osuus on laskelmien mukaan peräti 85,8 % (kuva 4).

Ilmaston lämpeneminen kg CO₂e/m²/a - Resurssityypit

● Kaukolämpö - 64.4%
 ● Sähkö - 21.4%
 ● Muut talotekniset järjestelmät - 14.2%



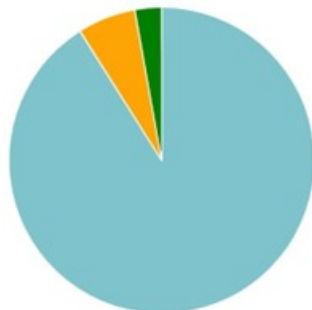
Kuva 4. Sammatin koulun talotekniikan ja energiankulutuksen hiilijalanjäljen jakautuminen

Sammatin koulun lämmittäminen kaukolämmöllä aiheuttaa päästöjä 8,7 kgCO₂e/m²/a eli vuodessa yhteensä 25 tCO₂e. Taloteknisten järjestelmien materiaalisidonnainen hiilijalanjälki on ympäristöministeriön arviointimenetelmässä opetusrakennuksille asetettujen neliömetripohjaisten oletusarvojen perusteella laskettuna 1,92 kgCO₂e/m²/a. Oletusarvon mukaisesti Sammatin koulurakennuksen koko elinkaaren aikaiset talotekniikan materiaalisidonnaiset päästöt ovat yhteensä 278 tCO₂e.

Öljylämmitteisen Karjalohjan koulurakennuksen talotekniikan materiaalisidonnaisen ja käytönaikaisen energiankulutuksen kokonaishiilijalanjälki on tutkimustulosten mukaan 67,93 kgCO₂e/m²/a. 50 vuoden elinkaaren ajalta talotekniikan kokonaishiilijalanjälki on 3 397 kgCO₂e/m² eli yhteensä 5 353 tCO₂e. Pelkän öljylämmityksen osuus tästä on 91 % (kuva 5).

Ilmaston lämpeneminen kg CO₂e/m²/a - Resurssityypit

● Öljypohjaiset polttoaineet - 91.0%
 ● Sähkö - 6.1%
 ● Muut talotekniset järjestelmät - 2.8%



Kuva 5. Karjalohjan koulun talotekniikan ja energiankulutuksen hiilijalanjäljen jakautuminen

Ympäristöministeriön arviointimenetelmän mukaisten laskelmien perusteella Karjalohjan koulun öljylämmityksen päästöt ovat 61,83 kgCO₂e/m²/a eli yhden vuoden aikana yli 97 tCO₂e. Koko 50 vuoden elinkaaren ajalta öljylämmityksen hiilijalanjälki on 4 872 tCO₂e. Koulun talotekniikan materiaalisidonnaiset päästöt ovat puolestaan rakennuksen elinkaaren ajalta arvioituina 151 tCO₂e:n luokkaa.

Järnefeltin yhtenäiskoulun talotekniikan ja energiankulutuksen kokonaishiilijalanjälki on laskennallisten tutkimustulosten mukaan 9,24 kgCO₂e/m²/a. Koko 50 vuoden elinkaaren ajalta talotekniikan päästöjä syntyy siis 462 kgCO₂e/m². Järnefeltin yhtenäiskoulun kokoisessa opetusrakennuksessa elinkaaren kokonaishiilijalanjälki talotekniikan osalta on yhteensä 2 860 tCO₂e. Kaukolämmöllä lämmitettävän opetusrakennuksen kaiken energiankulutuksen osuus taloteknisten järjestelmien hiilijalanjäljestä on yhteensä 79,2 % (kuva 6).

Ilmaston lämpeneminen kg CO₂e/m²/a - Resurssityypit

● Kaukolämpö - 53.0%
 ● Sähkö - 26.2%
 ● Muut talotekniset järjestelmät - 20.8%



Kuva 6. Järnefeltin yhtenäiskoulun talotekniikan ja energiankulutuksen hiilijalanjäljen jakautuminen

Rakennuksen lämmittämisen päästöt Järnefeltin yhtenäiskoulussa ovat 4,9 kgCO₂e/m²/a eli kaukolämmön hiilijalanjälki vuoden ajalta on yli 30 tCO₂e. Talotekniikan materiaalisidonnaiset päästöt vastaavat tulosten mukaan 20,8 %:sta opetusrakennuksen talotekniikan kokonaispäästöistä. Koulun 50-vuotisen elinkaaren aikana se tekee yhteensä 594 tCO₂e.

7 POHDINTA

Tutkimustuloksia talotekniikan hiilijalanjäljestä ja osuudesta vähähiilisessä rakentamisessa on vasta vähän ja tulokset vaihtelevat sen mukaan, mistä näkökulmasta talotekniikan roolia tarkastellaan. Muun muassa rakennuksen energiatehokkuuden ja sisäilmaolosuhteita optimoivan talotekniikan materiaalmäärien välinen yhteys kaipaa kipeästi lisäselvityksiä. Samoin määritelmä vähähiilisestä rakentamisesta vaatii konkreettisempaa tarkennusta, sillä raja-arvoja sille, millainen hiilijalanjälki tietyllä rakennustyyppillä saa maksimissaan olla, puuttuu vähähiilisen rakentamisen ohjauksesta ja lainsäädännöstä. Raja-arvojen määrittäminen on parhaillaan käynnissä Suomen ympäristöministeriössä ja raja-arvot tullaan julkistamaan uutta rakentamislakia täydentävässä asetuksessa.

Hiilineutraalissa yhteiskunnassa myös vähähiilisen rakentamisen on kehitettävä kohti hiilineutraaliutta, joten oletettavaa on, että rakentamisesta aiheutuvien päästöjen raja-arvot määritetään kiristyviksi ajan kuluessa. Rakennuslupatoimintaa ja -viranomaisia varten asetettujen neliömetripohjaisten raja-arvojen lisäksi rakennushankkeille on määritettävä myös tavoite kokonaishiilijalanjäljestä. Globaalin hiilibudjetin näkökulmasta on ratkaisevaa, millainen ilmasto-vaikutus rakennetulla ympäristöllä kokonaisuudessaan on, ja siksi rakennusten lopullinen, koko elinkaaren aikainen hiilijalanjälki on otettava päästö-määrien tarkastelussa huomioon.

Ympäristöministeriön Rakennuksen vähähiilisyyden arviointimenetelmässä talotekniikan materiaalimäärät on arvioitu karkeiden keskiarvojen perusteella ja osa komponenteista on jätetty laskennasta kokonaan pois. Talotekniikan materiaalisidonnaiset päästöt ovat arviointimenetelmässä vakioituina määrinä neliometriä kohden, joten taloteknisten järjestelmien materiaalipäästöt vaihtelevat ainoastaan tyyppirakennuksen pinta-alan mukaan. Vaikka neliöpohjaisiin talotekniikkamateriaalien päästöarvioihin on uupuvat osat huomioitu konservatiivisella kertoimella, ei tulosten tarkkuus ole vakuuttava. Sveitsiläisen tutkimusryhmän toteuttamien laskelmien tavoin talotekniikan yksityiskohtainen hiilijalanjälkilaskenta mallinnusohjelmia hyödyntäen olisikin perusteltua toteuttaa ilmastaselvityksiä vaativissa rakennushankkeissa tarkempien laskentatulosten saavuttamiseksi.

Taloteknisten järjestelmien materiaalisidonnaisen hiilijalanjäljen kartoittaminen on kokonaisuudessaan haastavaa eikä yksityiskohtaisen laskennan toteuttamiseen ole tarkoituksenmukaista työkalua. Taloteknisten järjestelmien ympäristövaikutusten tarkka arviointi vaatii kaikkien laitteiden, komponenttien ja materiaalien huomioimista hiilijalanjälkilaskennassa, mikä yksilöllisissä rakennusprojekteissa on usein haasteellista. Talotekniikka pitää sisällään monimutkaisia ja moniosaisia järjestelmiä, jotka ovat osa kokonaisuutena toimivaa rakennusta. Rakennusten suunnittelutyössä käytettävää tietomallintamista on mahdollista hyödyntää taloteknisten järjestelmien komponenttien kartoittamisessa, mutta sen käytettävyydessä on vielä kehitettävää. Talotekniikan osien yksityis-

kohtainen litterointi ja luettelointi materiaali- ja massamääristä on välttämätöntä, jotta kaikki todelliset talotekniikan osat saadaan mukaan päästölaskentaan.

Aiempien tutkimusten tulokset talotekniikan materiaalisidonnaisista päästöistä ovat ristiriitaisia. Sveitsiläisen tutkimusryhmän tekemät laskelmat toimistorakennuksen hiilijalanjäljestä osoittavat, että talotekniikan osuus hiilijalanjäljestä on raskaampi kuin mitä aiemmat tutkimukset aiheesta ovat todistaneet. Suomalaisissa diplomitoissa laskelmat ovat puolestaan osoittaneet, että talotekniikan osuus rakennuksen hiilijalanjäljestä on pienempi kuin mitä ympäristöministeriön arviointimenetelmän mukainen neliöpohjainen arvio antaa tulokseksi. Oleellista vaikuttaisi olevan se, että talotekniikan osuuden selvityksessä päätäisiin tekemään yksityiskohtaista laskentaa, jotta yksilöllisen rakennuksen todelliset talotekniikan määrät ja materiaalit tulevat huomioituiksi ja mukaan hiilijalanjäljen arviointiin.

Mielenkiintoinen näkökulma talotekniikan materiaalisidonnaisten päästöjen suuruuteen on lakisääteisten rakennusten olosuhteiden laatuun vaikuttavien tekijöiden vaikutus. Kun vaatimukset laadukkaasta sisäilmasta, sisälämpötilasta ja rakennuksen energiatehokkuudesta kiristyvät, lisääntyvät talotekniikan materiaalmäärät rakennuksessa ja sitä myötä myös talotekniikan ilmastovaiikutukset. Talotekniikkaan käytettävien hiili-intensiivisten materiaalien korvaaminen voi sekin olla haastavaa, esim. teräksisen ilmanvaihtokanaviston korvaaminen muulla materiaalilla heikentämättä rakennuksen paloturvallisuutta.

Vaikka talotekniikan materiaalmäärät arvioidaan rakennuksen elinkaaren ajalta usein pieniksi, rakennusten energiankäyttöön talotekniikalla on suuri vaikutus. Erityisesti lämmitysenergian jako ja talteen ottaminen talotekniikkaa hyödyntäen vaikuttavat merkittävästi rakennusten ilmastovaiikutuksiin. Opin- näytetyön tutkimustulokset osoittavat selkeästi, että energiankäytöllä on suurin vaikutus taloteknisten järjestelmien käytönaikaiseen hiilijalanjälkeen. Fossiilisten polttoaineiden käyttö heikon energiatehokkuuden omaavassa opetusrakennuksessa kuormittaa ilmastoa enemmän kuin lähes neljä kertaa suurempi, mutta energiatehokkaampi koulurakennus.

Energiantuotannon vihreä siirtymä tulee muuttamaan suomalaisten rakennusten hiilijalanjälkeä huomattavasti. Kun rakennusten tarvitsema energia on tuotettu uusiutuvilla energiamuodoilla, voimistuu rakennusmateriaalien suhteellinen osuus rakennussektorin aiheuttamista päästöistä. Ennusteiden mukaan materiaalien tarve kasvaa rakennuksiin tarvittavien tekniikoiden ja automaatioiden myötä, joten rakennusmateriaalien raaka-aineet nousevat entistä merkityksellisempään asemaan rakennusten elinkaariarvioinnissa. Kuten YK:n ympäristöohjelman raportti [5] vuodelta 2022 osoittaa, rakennussektorilla tulisi kiinnittää entistä enemmän huomiota rakennusten pinta-aloihin, sillä suurempi rakennus vaatii suurempia määriä rakennusmateriaalia. Rakennusmateriaalien hiilijalanjälki käy siten raskaammaksi ja energiatehokkuuden tuomat hyödyt häviävät lisääntyneiden materiaalisidonnaisten päästöjen myötä. Opinnäytetyön tuloksista on huomioitavissa, että tarkastelun kohteena olleista opetusrakennuksista pinta-alaltaan suurimmalla Järnefeltin yhtenäiskoululla myös talotekniikkajärjestelmien materiaalisidonnaiset päästöt olivat prosentuaalisesti suurimmat rakennuksen koko elinkaaren ajalta.

Taloteknisten järjestelmien hiilijalanjäljen selvittäminen vaatii lisätutkimuksia ja entistä yksityiskohtaisempaa laskentaa rakennusten elinkaariarvioinnin tueksi. Taloteknisten järjestelmien ilmastovaikutuksiin voidaan vaikuttaa monella tavalla ja mielenkiintoista olisikin selvittää mm. kunnossapidon ja huoltotoimenpiteiden merkitystä taloteknisten järjestelmien hiilijalanjäljen muodostumisessa. Rakennusten energiatehokkuuden lisäämisessä erilaiset lämmön talteenoton ratkaisut, esim. ilmanvaihdosta tai jätevesistä, ovat tutkimuksen arvoisia keinoja hyödyntää rakennusten ns. hukkalämpöä ja pienentää näin rakennuksen käytönaikaista hiilijalanjälkeä.

Rakennusten elinkaariarviointia tehdessä on oleellista valita hiilijalanjäljen laskentaan soveltuva arviointimenetelmä. Vertailtaessa rakennusprojektin erilaisia toteutusvaihtoehtoja tai eroja eri rakennusten välillä on tärkeää, että elinkaariarviointi toteutetaan kaikilla vaihtoehdoilla samaa arviointimenetelmää käyttäen. Eri arviointimenetelmillä toteutetut laskelmat eivät ole verrannollisia keskenään. Tästä huolimatta olisi mielenkiintoista selvittää ympäristöministeriön arviointimenetelmän antamia tuloksia toisen, samoille sääolosuhteille luo-

dun arviointimenetelmän tuloksiin. Analyysi eri arviointimenetelmien painotuksista ja menetelmän rakenteista auttaisi paremmin ymmärtämään elinkaariarvioinnin kokonaisuutta ja siihen vaikuttavia tekijöitä.

Ympäristöministeriön arviointimenetelmällä tehdyt hiilijalanjälkilaskennan tulokset katsotaan luotettaviksi, kun laskentaperusteet ovat kyseisen arviointimenetelmän mukaisesti toteutettu. Kun laskennassa käytetään uuden rakennuksen energiatehokkuudesta annetun asetuksen mukaisia laskennallisia ostoenergian määriä, arviointimenetelmää varten koottuja taulukkoarvoja sekä kansallista päästötietokantaa, voidaan Rakennuksen vähähiilisyyden arviointimenetelmän mukaisesti laskentatuloksiin luottaa. [22.] Luotettavuuden ehdot toteutuvat One Click LCA -ohjelmalla toteutetussa laskennassa, sillä EN- ja ISO-standardeja tukevalla laskentaohjelmistolla on hiilijalanjäljen selvitys mahdollista suorittaa kyseisellä arviointimenetelmällä. Tästä syystä voidaan myös olettaa, että opinnäytetyön laskentatulokset ovat luotettavia. Laskenta on toteutettu ympäristöministeriön arviointimenetelmän mukaisesti ja laskennassa on käytetty ohjeiden mukaisesti opetusrakennusten energiatodistusten laskennallisia ostoenergian määriä.

8 JOHTOPÄÄTÖKSET

Kirjallisuuskatsauksen tutkimusaineiston ja One Click LCA -ohjelmalla toteutetun talotekniikan hiilijalanjälkilaskennan perusteella voidaan todeta, että tarkastelun kohteena olleiden opetusrakennusten talotekniikkajärjestelmien hiilijalanjäljestä suurin osa muodostuu rakennusten käytönaikaisesta energiankulutuksesta. Laskennan tulokset vahvistavat entisestään talotekniikan hiilijalanjälkeä käsittelevien aiempien tutkimusten tuloksia energiankäytön merkityksestä rakennusten ilmastovaikutuksista. Erityisesti lämmitysjärjestelmän energianlähteenä toimiva polttoaine vastaa suurimmaksi osaksi koulurakennusten taloteknisistä päästöistä. Fossiilisten polttoaineiden vaikutus talotekniikan käytönaikaiseen hiilijalanjälkeen on siis edelleen merkittävä ja relevantti tekijä energiantuotannossa vallitsevasta vihreästä siirtymästä huolimatta.

Opinnäytetyössä tarkasteltujen koulurakennusten lämmitysvaihtoehtoina ovat kaukolämpö tai öljylämmitys. Lämmityksen päästöjä koskevien laskentatulosten perusteella voidaan todeta, että öljylämmityksellä on yli 7 kertaa raskaampi hiilijalanjälki kuin kaukolämmöllä, kun verrataan keskenään Sammatin ja Karjalohjan kouluja, kahta samantyyppistä 1950-luvulla rakennettua 3-kerroksista opetusrakennusta. Energiatodistuksen vuosittaisista nettoneliöpohjaisista energiankulutustiedoista voidaan myös päätellä, että Sammatin koulu on Karjalohjan koulua selvästi energiatehokkaampi rakennus, niin sähkönkulutuksen kuin lämmityksenkin osalta.

Kun Karjalohjan koulun öljylämmityksen neliömetrikohtaista hiilijalanjälkeä verrataan lähes 4-kertaa suuremman kaukolämmöllä lämpiävän Järnefeltin koulurakennuksen lämmityksen neliömetripohjaiseen hiilijalanjälkeen, nousee öljylämmityksen päästöt yli 12-kertaisiksi. Tulosten perusteella voidaan todeta, että vaikka kaukolämpö aiheuttaa sekin kasvihuonekaasupäästöjä, niin 100 %:sti fossiilisella polttoaineella tapahtuva rakennuksen lämmittäminen vaikuttaa rakennuksen taloteknisten järjestelmien ja erityisesti energiankäytön hiilijalanjälkeen kaikista voimakkaimmin. Karjalohjan ja Järnefeltin koulurakennusten energiatodistusten lämmityskulutietojen pohjalta on myös huomionarvoista todeta, että Järnefeltin yhtenäiskoulun lämmittäminen kaukolämmöllä onnistuu yli 2,8 kertaa energiatehokkaammin kuin Karjalohjan koulurakennuksen lämmitys, kun tarkastelun kohteena on lämmityksen kulutus opetusrakennuksen nettoneliötä kohden.

Vertailtaessa Sammatin ja Järnefeltin opetusrakennusten talotekniikan hiilijalanjälkeä keskenään voidaan rakennuksen lämmityksen kokonaispäästöistä todeta, että vaikka molemmat opetusrakennukset lämpiävät kaukolämmöllä, vaikuttaa rakennuksen energiatehokkuus hiilijalanjälkeen selvästi. Pinta-alaltaan yli kaksi kertaa suuremman mutta energiatehokkaamman Järnefeltin yhtenäiskoulun lämmityksen hiilijalanjälki on vuodessa neliömetriltä 4,9 kgCO₂e, kun taas Sammatin koulun lämmityksen päästöt ovat 8,7 kgCO₂e/m²/a. Vuositasolla Järnefeltin koulun lämmityksen kokonaispäästöt ovat siis noin 30,3 kgCO₂e ja Sammatin koulun 25,2 kgCO₂e. Energiatehokkuuden ansiosta Järnefeltin yhtenäiskoulun lämmityksen hiilijalanjälki ei laskelmien mukaan ole pinta-alasta huolimatta yli kaksinkertainen Sammatin koulurakennukseen verrattuna.

Opetusrakennusten talotekniikan materiaalisidonnaiset päästöt ovat ympäristöministeriön Rakentamisen vähähiilisyiden arviointimenetelmän mukaisesti 1,92 kgCO₂e/m²/a. Opinnäytetyössä tarkastelun kohteina olleiden peruskoulujen hiilijalanjälkilaskennan perusteella voidaan todeta, että rakennuksen energiankulutuksen hiilijalanjäljen pienentyessä materiaalisidonnaisten päästöjen suhteellinen osuus talotekniikan kokonaishiilijalanjäljestä kasvaa. Sammatin koulussa talotekniikan materiaalipäästöt ovat 14,2 % ja Karjalohjan koulussa vain 2,8 %. Tulokset vahvistavat aiempien kotimaisten tutkimusten linjaa siitä, että taloteknisten järjestelmien tuotesidonnaiset päästöt ovat alle 15 % rakennusten kokonaishiilijalanjäljestä.

Energiatehokkaimmassa ja neliöiltään muita tarkastelun kohteena olleita opetusrakennuksia selvästi suuremmassa Järnefeltin koulussa taloteknisten järjestelmien materiaalisidonnainen osuus rakennuksen hiilijalanjäljestä kipuaa jo lähelle 21 %. Laskentatulokset vahvistaa aiempien tutkimusten tuloksia siitä, että taloteknisten tuotesidonnaisten päästöjen suhteellinen osuus rakennuksen kokonaishiilijalanjäljestä kasvaa energiatehokkuuden parantuessa. Samaan lopputulokseen päätyivät mm. sveitsiläisen tutkimusryhmän jäsenet selvittäessään energiatehokkaan toimistorakennuksen talotekniikan hiilijalanjälkeä.

Ympäristöministeriön Rakennuksen vähähiilisyiden arviointimenetelmän tyyppirakennuksille määrittelemän neliömetripohjaisen talotekniikan päästöarvion vuoksi eri talotekniikkajärjestelmien hiilijalanjälkilaskennat ovat haastavia toteuttaa tuntematta rakennuskohteita tarkemmin. Tämän vuoksi opinnäytetyön kirjallisuuskatsauksen aineistossa esiintyneen ilmanvaihtojärjestelmän hiilijalanjäljen yksityiskohtainen laskenta ei onnistu. Ilmanvaihtojärjestelmän rooli talotekniikan osuudessa rakennuksen hiilijalanjäljestä on kirjallisuuskatsauksen mukaan kuitenkin merkittävä. Lämmitysjärjestelmän roolissa painottuu enemmän energiankulutuksen päästöt ja energian laatu- ja ympäristövaikutukset, eikä niinkään järjestelmän materiaalisidonnaiset ilmastovaikutukset.

Opinnäytetyön hiilijalanjälkilaskennan kohteina olleiden opetusrakennusten 50-vuotisen elinkaaren aikaisia talotekniikan kokonaispäästöjä vertailtaessa selviää, että raskain talotekniikan hiilijalanjälki on öljylämmitteisellä Karjaloh-

jan koululla, vaikka opetusrakennuksen pinta-ala on vertailtavista rakennuksista kaikkein pienin. Sammatin ja Järnefeltin koulujen elinkaaren aikaisten talotekniikan kokonaispäästöjen tarkastelu paljastaa, että energiatehokkuus ei kuitenkaan ole ainoa tekijä, jolla on merkitystä rakennuksen talotekniikan hiilijalanjälkeen. Vaikka Järnefeltin yhtenäiskoulu on tarkastelun kohteena olleista koulurakennuksista kaikista energiatehokkain ja neliometriä kohden talotekniikan kokonaispäästöt ovat pienimmät, niin tästä huolimatta Sammatin koulun opetusrakennuksen elinkaaren aikaiset talotekniikan kokonaispäästöt ovat vertailun pienimmät. Tässä ratkaisevaksi tekijäksi nousee opetusrakennuksen lämmitettävä pinta-ala, mikä Järnefeltin koulussa on yli kaksinkertainen Sammatin kouluun verrattuna.

Opinnäytetyössä toteutetun hiilijalanjälkilaskennan tulokset antavat vahvistusta sille, miksi YK:n ympäristöohjelma painottaa rakennussektorin ilmasto-vaikutusten pienentämiseksi toimenpiteitä erityisesti rakennusten energian kulutukseen ja rakennetun pinta-alan määrään. Tulosten perusteella voidaan päätellä, että vaikka energiatehokkuus pienentää rakennuksen käytönaikaista hiilijalanjälkeä merkittävästi, niin toisaalta pinta-alan kasvu lisää sekä rakennusmateriaalin että kokonaisenergiatarpeen määrää. Tästä syystä olisikin perusteltua vertailla Rakennustiedon Kohti vähähiilistä rakentamista -oppaan [2] mukaisesti rakennuksen energiatehokkuuteen kohdistuvien perusparannusten aiheuttamia materiaali- ja käyttösidonnaisia päästöjä toimenpiteistä aiheutuviin hyötyihin rakennuksen koko elinkaaren ajalta. Vaikka energiatehokkuuden parantaminen pienentäisikin rakennuksen neliometrikohtaista energiankulutusta ja käytönaikaisia energiankulutuksen päästöjä, niin viime kädessä rakennuksen koko elinkaaren aikaiset päästöt paljastavat sen todellisen kokonaishiilijalanjäljen.

LÄHTEET

1. Green Building Council Finland. Vähähiilisuuden sanakirja. PDF-dokumentti. 27.5.2020. Saatavissa: [GBC-Vähähiilisuuden-sanakirja-27.5.2020.pdf \(figbc.fi\)](#) [viitattu 15.4.2023].
2. Häkkinen, T., Kuittinen, M. Kohti vähähiilistä rakentamista – Opas arviointiin ja suunnitteluun. Helsinki: Rakennustieto Oy. 2020.
3. Bionova Oy. Tiekartta rakennuksen elinkaaren hiilijalanjäljen huomioimiseksi rakentamisen ohjauksessa. PDF-dokumentti. 29.6.2017. Saatavissa: [Tiekartta-rakennuksen-elinkaaren-hiilijalanjaljen-huomioonottamiseksi-rakentamisen-ohjauksessa-4B3172BC_4F20_43AB_AA62_A09DA890AE6D-129197.pdf \(ym.fi\)](#) [viitattu 7.3.2023].
4. Tilastokeskus. Kasvihuonekaasupäästöt Suomessa, 1990–2021. WWW-dokumentti. 19.3.2023. Saatavissa: [Kasvihuonekaasupäästöt Suomessa muuttujina Vuosi, Päästöluokka, Kasvihuonekaasu ja Tiedot. PxWeb \(stat.fi\)](#) [viitattu 19.3.2023].
5. UN environment programme. Emissions Gap Report 2022. The Closing Window: Climate crisis calls for rapid transformation of societies. PDF-dokumentti. 2022. Saatavissa: [EGR2022.pdf](#) [viitattu 7.3.2023].
6. Kiamili, C., Hollberg, A. & Habert, G. Detailed Assessment of Embodied Carbon of HVAC Systems for a New Office Building Based on BIM – Case report. *Sustainability, 2020, Vol.12 (8)*. PDF-dokumentti. 2020. Saatavissa: [Sustainability | Free Full-Text | Detailed Assessment of Embodied Carbon of HVAC Systems for a New Office Building Based on BIM \(mdpi.com\)](#) [viitattu 8.4.2023].
7. Huuhka, S., Vainio, T., Moisio, M., Lampinen, E., Knuutinen, M., Bashmakov, S., Köliö, A., Lahdensivu, J., Ala-Kotila, P. & Lahdenperä, P. Purkaa vai korjata? Hiilijalanjälkivaikutukset, elinkaarikustannukset ja ohjauskeinot. Ympäristöministeriön julkaisuja 2021:9. PDF-dokumentti. Saatavissa: [Purkaa vai korjata? Hiilijalanjälkivaikutukset, elinkaarikustannukset ja ohjauskeinot \(valtioneuvosto.fi\)](#) [viitattu 26.3.2023].
8. Euroopan unionin neuvosto. Pariisin ilmastopöytäkirja. WWW-dokumentti. Päivitetty 3.2.2023. Saatavissa: [Pariisin ilmastopöytäkirja - Council \(europa.eu\)](#) [viitattu 8.4.2023].
9. Ympäristöministeriö. Hallituksen ilmastopolitiikka: kohti hiilineutraalia Suomea 2035. WWW-dokumentti. 2023. Saatavissa: [Hiilineutraali Suomi 2035 - Ympäristöministeriö](#) [viitattu 7.3.2023].
10. Ympäristöministeriö. Vähähiilisen rakentamisen tiekartta. WWW-dokumentti. 2023. Saatavissa: [Vähähiilisen rakentamisen tiekartta - Ympäristöministeriö](#) [viitattu 11.3.2023].

11. Ympäristöministeriö. Vähähiilisen rakennetun ympäristön ohjelma. WWW-dokumentti. 2023. Saatavissa: [Vähähiilinen rakennettu ympäristö - Ympäristöministeriö](#) [viitattu 11.3.2023].
12. Ympäristöministeriö. Eduskunta hyväksyi rakentamisen päästöjä pienentävät ja digitalisaatiota edistävät lait. WWW-dokumentti. Päivitetty 1.3.2023. Saatavissa: [Eduskunta hyväksyi rakentamisen päästöjä pienentävät ja digitalisaatiota edistävät lait - Ympäristöministeriö](#) [viitattu 7.3.2023].
13. Maankäyttö- ja rakennuslaki 5.2.1999/132.
14. SFS-EN 15978:en. 2012. Sustainability of construction works. Assessment of environmental performance of buildings. Calculation method.
15. Ahola, R. & Liljeström, K. Rakennuksen elinkaaren hiilijalanjäljen pienentäminen kustannustehokkaasti vuokratilohteessa. Asumisen rahoitus- ja kehittämiskeskuksen raportteja 08/2018. PDF-dokumentti. Saatavissa: [Hiilijalanjäljen-pienentäminen-kustannustehokkaasti 2018.pdf \(figbc.fi\)](#) [viitattu 12.4.2023].
16. Raatikainen, V. Asiakkaan päästöjen vähentäminen talotekniikkasuunnittelussa. Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT. School of Energy Systems - Energiatekniikan koulutusohjelma. Diplomityö. PDF-dokumentti. 2021. Saatavissa: [Diplomityö Raatikainen Valle.pdf \(lut.fi\)](#) [viitattu 22.4.2023].
17. Näsänen, H. Taloteknisten järjestelmien elinkaaren ilmastovaikutukset. Aalto yliopisto. Sustainable Energy in Buildings and Built Environment. Master's Programme in Advanced Energy Solutions. Diplomityö. WWW-dokumentti. 2021. Saatavissa: [Taloteknisten järjestelmien elinkaaren ilmastovaikutukset \(aalto.fi\)](#) [viitattu 22.4.2023].
18. Torkki, J. Vähähiilisen asuinrakennuksen LVI-suunnittelu. Aalto yliopisto. Sustainable Energy in Buildings and Built Environment. Master's Programme in Advanced Energy Solutions. Diplomityö. WWW-dokumentti. 2021. Saatavissa: [Vähähiilisen asuinrakennuksen LVI-suunnittelu \(aalto.fi\)](#) [viitattu 22.4.2023].
19. Laasonen, N., Pluuman, K. & Suur-Uski, T. Raportti: Talotekniikan päästötietojen selvityshanke. Sweco Talotekniikka Oy. PDF-dokumentti. 19.3.2021. Saatavissa: [YM TATE Päästöt loppuraportti.pdf](#) [viitattu 11.3.2023].
20. Ympäristöministeriö. Rakentamisen päästöjä voidaan nyt vertailla – uusi päästötietokanta luo perustan vähähiilisen rakentamisen säädösohjaukselle. WWW-dokumentti. Päivitetty 1.3.2021. Saatavissa: [Rakentamisen päästöjä voidaan nyt vertailla – uusi päästötietokanta luo perustan vähähiilisen rakentamisen säädösohjaukselle - Ympäristöministeriö](#) [viitattu 15.3.2023].

21. Sokka, L., Correia, S. & Koljonen, T. Lämmityspolttoaineiden tuotannon elinkaariset kasvihuonekaasupäästöt. VTT Technology 336. Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy. PDF-dokumentti. 2018. Saatavissa: [VTT Technology 336: Lämmityspolttoaineiden tuotannon elinkaariset kasvihuonekaasupäästöt](#) [viitattu 12.4.2023].
22. Ympäristöministeriö. Rakennuksen vähähiilisuuden arviointimenetelmä. Ympäristöministeriön julkaisuja 2019:22. PDF-dokumentti. Saatavissa: [Rakennuksen vähähiilisuuden arviointimenetelmä \(valtioneuvosto.fi\)](#) [viitattu 15.4.2023].
23. Ruuska, A. & Häkkinen, T. Rakennusmateriaalien ympäristövaikutukset – taustaraportti. VTT. PDF-dokumentti. 2013. Saatavissa: [Tutkimusraportti \(vtt.fi\)](#) [viitattu 15.4.2023].
24. One Click LCA. Luotettava koko rakennuksen elinkaariarviointi, hetkessä. WWW-dokumentti. 2023. Saatavissa: [Automatsoi rakennuksen elinkaariarviointi One Click LCA:n avulla](#) [viitattu 16.4.2023].
25. Energiatodistusrekisteri. Samatkan koulun energiatodistus 2018 – Kooste. WWW-dokumentti. 2022. Saatavissa: <https://www.energiatodistusrekisteri.fi/energiatodistus?id=288692&versio=2018> [viitattu 22.4.2023].
26. Energiatodistusrekisteri. Karjalohjan koulun energiatodistus 2018 – Kooste. WWW-dokumentti. 2022. Saatavissa: <https://www.energiatodistusrekisteri.fi/energiatodistus?id=288674&versio=2018> [viitattu 22.4.2023].
27. Energiatodistusrekisteri. Järnefeltin yhtenäiskoulun energiatodistus 2018 – Kooste. WWW-dokumentti. 2022. Saatavissa: <https://www.energiatodistusrekisteri.fi/energiatodistus?id=287797&versio=2018> [viitattu 22.4.2023].