



Jesse Kurkinen

Excel-laskentataulukko simuloidun ja toteutuneen lämmitystarpeen yh- tenäistämiseen

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (YAMK)

Talotekniikka

Opinnäytetyö

1.6.2023

Tiivistelmä

Tekijä:	Jesse Kurkinen
Otsikko:	Excel-laskentataulukko simuloidun ja toteutuneen lämmitystarpeen yhtenäistämiseen
Sivumäärä:	37 sivua
Aika:	1.6.2023
Tutkinto:	insinööri (YAMK)
Tutkinto-ohjelma:	talotekniikka
Ammatillinen pääaine:	LVI-tekniikka
Ohjaajat:	yliopettaja Rauno Holopainen kehityspäällikkö Joni Hilpinen

Opinnäytetyössä tehtiin excel pohjainen laskentataulukko rakennuksen tilojen ja ilmanvaihdon lämmitystarpeen yhtenäistämiseen. Laskenta tehdään toteutuneen ja simuloidun energiakulutuksen perusteella, jossa arvioidaan lämpimänkäyttöveden lämmitysenergian kulutuksen osuuden olevan 30 % lämmitysenergian kokonaiskulutuksesta. Työn ulkopuolelle jätetään rakennuksen jäähdytys- ja sähköenergian kulutus. Lämmitysenergian kulutus normeerataan, jolloin simuloidun ja toteutuneen lämmitysenergian kulutuksia voidaan vertailla keskenään.

Laskennan lähtötietona tarvitaan rakennuksen toteutuneet lämmitysenergian kulutus ja rakennuksen simuloitu lämmitysenergian tarve. Yleensä simuloitu ja toteutunut lämmitysenergian tarpeet eivät ole yhtä suuria eri tarkasteluajanjaksoina. Energiasuunnittelija voi tarkentaa simuloidun energiakulutuksen käyttöaikoja ja huipputehujen tarvetta Excel-laskentataulukon perusteella.

Lämpimän käyttöveden kiertojohtoon lämmitystarpeen osalta mittaustulokset osoittivat, että simulointi mallissa käytetyt lähtötiedot olivat puutteellisia. Mittaustuloksien perusteella kiertojohtoon tehoksi arvioitiin 4 kW, joka oli 33 % suurempi kuin lähtötietojen perusteella. Lämpimän käyttöveden vuosittaisen lämmitystarpeen arvioitiin olevan ympäristöministeriön asetuksen 1010/2017 mukaisesti 36 300 kWh/a. Kesäkuukausien lämmitystarpeen tarkastelun tuloksena käyttöveden lämmitystarve oli 47 760 kWh/a. Lämpimän käyttöveden arvioitu lämmitystarve oli 32 % suurempi kuin asetuksen vakioituun käyttöön perustuva lämmitystarve.

Työn tuloksena syntyy laskentataulukko Sweco Finland Oy:n talotekniikan osaston energiasuunnittelijoille, jota apuna käyttäen pystyvät simuloimalla todentamaan aikaisempaa tarkemmin rakennuksen tarvitseman lämmitysenergian tarpeen saneeraus- ja energiakorjaushankkeissa. Energiakorjauksia toteutetaan entistä enemmän, joita edistää valtion asettama hiilineutraalius tavoite vuoteen 2035 mennessä. Tällä hetkellä yli 60 % rakennuksien lämmitysenergian kulutuksesta käytetään tilojen lämmitykseen.

Avainsanat: lämmitysenergia, normeeraus, lämmitystarveluku, toteutunut kulutus, simuloitu lämmitystarve, Excel-laskentataulukko.

Abstract

Author: Jesse Kurkinen
Title: Excel spreadsheet for unify Simulated Energy Consumption Data with Actual Measurement Data
Number of Pages: 37 pages
Date: 1 July 2023

Degree: Master of Engineering
Degree Programme: Building Services Engineering
Professional Major: HVAC Engineering
Supervisors: Rauno Holopainen, Principal Lecturer
Joni Hilpinen, Director of Development

The Master's thesis aimed at creating an Excel spreadsheet, based on both actual and simulated energy consumption, to unify the space and ventilation heating demands of a building. The domestic hot water was estimated at 30 % of the total heating energy consumption. Standardisation of heating energy consumption allowed for the comparison of the simulated and actual heating energy.

The actual and simulated heating energy demand were used as initial data for the calculation. The energy designer can specify the usage times of the simulated energy consumption and the need for peak power on the Excel spreadsheet.

The measurements showed that the initial data used in the simulation model for the heating demand of the domestic hot water were incomplete. The results indicated the power of the circulation line to be 33 % higher than calculated with the initial data. The thesis calculated the annual heating demand for the domestic water in the summer months to be 32 % higher than calculations based on the standard use of a regulation of the Ministry of the Environment.

The thesis resulted in an Excel spreadsheet for the energy designers of the commissioning company. The tool can be used to verify the heating energy demands of a building in renovation and energy repair projects more precisely than before.

Keywords: heating energy, standardization, degree day, actual consumption, simulated heating demand, Excel spreadsheet.

Sisällys

1	Johdanto	1
2	Teoriaa	2
2.1	Rakennuksen lämmitysenergian kulutuksen jakautuminen	2
2.2	Lämpimän käyttöveden kiertojohdon lämmitysenergia	3
2.3	Energiankulutuksen laskennassa käytettävä säädädata	4
2.4	Lämmitysenergian kulutuksen normeeraus	5
2.5	IDA ICE -simulointi	6
2.6	Rakenteiden lämpöhäviöiden määrittäminen	7
3	Lähtötiedot	9
3.1	Laskennassa käytetty esimerkkirakennus	9
3.2	Toteutunut lämmitysenergian kulutus	10
3.3	Simulointimalli	13
3.3.1	Simuloitu lämmitysenergian kulutus	13
3.3.2	Simuloidun rakennuksen lähtötiedot	14
4	Simuloidun ja toteutuneen lämmitystarpeiden analysointi	15
4.1	Lämpimän käyttöveden kiertojohdon lämmitystarpeen määrittäminen mittaus tuloksista	15
4.2	Lämpimän käyttöveden lämmitystarpeen määrittäminen mittaus tuloksista	18
4.3	Lämmitysenergian kulutuksen normeeraus normaalivuoteen	19
5	Simulointimallin parametrien optimointi	22
5.1	Lämpimän käyttöveden ja kiertojohdon lämmitystarve	22
5.2	Rakennuksen tilojen ja ilmanvaihdon lämmitystarve	25
6	Tulokset ja johtopäätelmät	30
6.1	Lämpimän käyttöveden ja kiertojohdon lämmitystarpeen määrittäminen	30
6.2	Rakennuksen tilojen ja ilmanvaihdon lämmitystarve	31
6.3	Lämmitystarpeiden käsittely kuukausi ja tuntitasolla	33
7	Yhteenveto	34
	Lähteet	35

1 Johdanto

Tässä opinnäytetyössä on tarkoituksena laatia Sweco Talotekniikalle excel-pohjainen laskentatyökalu, jolla voidaan tarkastella ja vertailla rakennuksen simuloitua ja toteutunutta lämmitysenergian tarvetta sekä jakautumista rakennuksen tiloissa. Työ sai ideansa, kun energiasuunnittelijat laativat energiakorjaus-hankkeissa parannusehdotuksia sekä määrittävät rakennuksen tilojen, ilmanvaihdon ja lämpimän käyttöveden lämmitykseen tarvittavien lämmöntuottolaitteiden tehot ja laskevat kiinteistön lämmitysenergian kulutuksen. Yleensä rakennuksen simuloitu ja toteutunut lämmitystehon tarve sekä energiankulutus eivät ole samansuuruisia. Simulointimallin lämmitysenergian tarvetta täytyy optimoida toteutuneeseen energiankulutukseen nähden, minkä jälkeen simulointimalli kuvastaa rakennuksen todellista lämpöteknistä käyttäytymistä ja mallilla voidaan tutkia parannus ehdotuksia.

Opinnäytetyössä tarkastellaan vain rakennuksen lämmitysenergian tarvetta, johon sisältää tilojen ja ilmanvaihdon, lämpimän käyttöveden ja käyttöveden kiertojohdon vuosittainen lämmitystarpeen. Työn ulkopuolelle on jätetty sähkö- ja jäähdytysenergiankulutus, joiden energian kulutuksiin ei tässä työssä oteta kanta. Tilojen ja ilmanvaihdon lämmitykseen käytettävä lämmitysenergia normeerataan simuloidun ja toteutuneen kulutuksen osalta, jotta energiakulutuksia voidaan verrata keskenään ja saadaan luotettavia sekä vertailukelpoisia tuloksia.

Vanhemmat rakennukset, joiden lämmöneristävyys ja ilmatiiviys ovat heikkoa ja, joiden poistoilmasta talteenottama lämpöenergian määrä on pieni, kuluttavat suuren määrän lämmitysenergiaa. Suomen asettama hiilineutraaliustavoite on vuoteen 2035, ja siihen liittyvien valtion tukemien energiakorjausten tavoitteena on vähentää rakennuksiin käytettävän lämmitysenergian määrää. Rakennuksen lämmitysenergian jakautumisen kautta pystytään hahmottamaan säästöpotentiaalit ja valitsemaan kustannustehokkaat parannustoimenpiteet lämmitysenergian kulutuksen vähentämiseksi. (1)

2 Teoriaa

2.1 Rakennuksen lämmitysenergian kulutuksen jakautuminen

Rakennuksen lämmitysenergian kulutusta voidaan seurata usealla energiamittauksella. Yleisesti kaukolämpökohteissa rakennuksen lämmitysenergian kulutus saadaan lämmönmyyjän energiamittarilla, kun mittaus on osa laskutusperustetta (2). Uusissa lämmitysjärjestelmissä on yleensä asennettu useampi alamittaus päämittauksen rinnalle lämmitysenergian kulutuksen seurantaan, koska nykyisin halutaan seurata järjestelmäkohtaisesti lämmitysenergian kulutusta. Energiankulutuksen seurannalla voidaan kohdentaa tarpeellisia huoltotoimenpiteitä, kun esimerkiksi todetaan lämmitysenergian kulutuksen kasvaneen selittämättömästä syystä tavanomaista suuremmaksi.

Lämmitysenergian kulutus voidaan jakaa liike- ja asuinrakennuksissa ilmanvaihdon ja tilojen lämmitykseen sekä lämpimän käyttöveden lämmitykseen, johon sisältyy lämpimän käyttöveden kiertojohdon lämpöhäviöt. Tilojen lämmityksen energiankulutus johtuu yleensä pääasiallisesti rakennuksen ulkovaipan ja ylä- sekä alapohjan lämpöhäviöistä. Rakennuksen ulkovaipan lisäksi tilojen lämmityksen energian kulutukseen vaikuttaa esimerkiksi rakennuksen tiiviys, joka ilmaistaan vaipan ilmanvuotolukuna. Hallitsemattomasti rakennuksen rakenteiden läpi tuleva ilma suurentaa lämpöhäviöitä, eteenkin talvella. (3)

Rakennuksen ilmanvaihto kuluttaa paljon lämmitysenergiaa, jos järjestelmässä ei ole toimivaa ja hyvän vuosihyötysuhteen omaavaa lämmöntalteenottoa. Lämmöntalteenoton vuosihyötysuhde kertoo, kuinka paljon ilmanvaihdon lämmöntalteenotto kattaa vuosittaisesta ilmanvaihdon lämmitystarpeesta. Lämmöntalteenotto siirtää poistoilmasta tuloilmaan lämmitysenergiaa ja mahdollisesti kosteutta, minkä ansioita vuosittainen lisälämmitystarve vähenee. Lämmöntalteenottolaitteiden vuosihyötysuhteet ovat parantuneet vuosien saatossa, mihin on vaikuttanut rakentamismääräysten lämmöntalteenoton vuosihyötysuhteen vähimmäisvaatimusten kiristyminen. Ilmanvaihdon lämmöntalteenoton lämpötilasuhte voidaan ilmoittaa esimerkiksi olevan yli 63 % yhtä suurilla ilmavirroilla,

mutta todellinen lämmöntalteenoton vuosihyötysuhde jää alle 60 %:n, jos ulospuhallusilman minimilämpötila on +5 °C ja sisäilman lämpötila on +21 °C. Ilmanvaihtojärjestelmän käytöllä on suuri merkitys ilmanvaihdon energiatehokkuuteen, kuten laitteiston käyttöajoilla, ilmavirtojen ohjauksilla, sisäänpuhalluslämpötiloilla sekä lämmöntalteenoton huurtumisenesto automaation säädöillä ja toiminnan säännöllisillä tarkastuksilla. Ilmanvaihtolaitteiston käyntiajat ja puhaltimien tehot tulisi asettaa rakennuksen tarpeiden ja tilatyypin mukaisesti, jotta tilojen ilmanvaihto ei ole turhalla käytöllä. (4)

2.2 Lämpimän käyttöveden kiertojohtoon lämmitysenergia

Rakennuksen lämpimän käyttöveden tuotantoon ja kiertoon tarvitaan lämmitysenergiaa. Lämpimän käyttöveden lämmitykseen käytetyn energia kulutukseen vaikuttaa rakennuksen sisälämpötila, kiertojohtoon pituus ja eristys, vesikalusteiden virtaamat ja käyttäjien kulutus tottumukset. Lämpimän käyttöveden kiertojohtolla varmistetaan veden laatu ja huolehditaan siitä, ettei vesikalusteella ole liian suuri lämpimän veden odotusaika (5).

Lämpimän käyttöveden kiertojohtoon vuosittaista lämmitysenergian tarvetta voidaan arvioida ympäristöministeriön ohjeen ”Energiatehokkuus - Rakennuksen energiankulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskenta (2018)” kaavalla 6.6 sekä taulukoiden 6.6 ja 6.7 arvoja käyttäen (6, s. 45–46). Tarkempi tieto lämpimän käyttöveden kiertojohtoon lämmitysenergian kulutuksesta saadaan lämmitysenergia kulutusmittauksella ja käyttöveden vesimäärällä. Lämmitysenergien kulutuksen seurannan analysoinnilla voidaan arvioida todellista lämmitysenergia kulutusta, kun tarkastellaan kesäkuukausien lämmitystarpeita (7, s. 78). Kesän lämpimimpien kuukausien aikana tilojen lämmitystarve on vähäinen ja lämmitystarpeen voidaan olettaa liittyvän käyttöveteen.

Kaavalla 1 voidaan arvioida lämpimän käyttöveden kiertojohtoon lämpöhäviöitä. Pumpun käyttöajaksi on määritetty 24 h/vrk, koska pumpun käyntiä ei saa päätkiä.

$$Q_{lkv,kierto} = (\varphi_{lkv,kiertohäviö,omin} L_{lkv} + \varphi_{lkv,lämmitys,omin} n_{lämmityslaite}) \frac{t_{lkv,pumppu} 365}{1000} \quad (1)$$

jossa

$Q_{lkv,kierto}$ on	lämpimän käyttöveden kiertojohtoon lämpöhäviö, kWh/a
$\varphi_{lkv,kiertohäviö,omin}$ on	lämpimän käyttöveden kiertojohtoon ominaisteho, W/m
L_{lkv} on	lämpimän käyttöveden kiertojohtoon pituus, m
$\varphi_{lkv,lämmitys,omin}$ on	lämpimän käyttöveden kiertojohtoon kytkettyjen lämmityslaitteiden ominaisteho, W/kpl
$n_{lämmityslaite}$ on	lämpimän käyttöveden kiertojohtoon kytkettyjen lämmityslaitteiden lukumäärä, kpl
$t_{lkv,pumppu}$ on	lämpimän käyttöveden kiertojohtoon pumpun käyttöaika, h/vrk

2.3 Energiankulutuksen laskennassa käytettävä säädata

Energiankulutuksen seurannassa ja vertailussa on käytettävä lämmitystarvelukua, joilla rakennuksen lämmitystarve saadaan vertailukelpoiseksi kyseisen kuukauden tai vuoden aikana. Käyttöveden lämmitysenergian kulutukseen lämmitystarvelukua ei käytetä, koska ulkolämpötilan vaihtelu ei vaikuta siihen merkittävästi. Suomessa Ilmatieteen laitos tuottaa lämmitystarveluvut, ja data on laadittavissa heidän verkkosivuiltaan. (8)

Lämmitystarveluvut lasketaan kuukausi kohtaisesti ja laskennassa huomioidaan päivät, joiden ulkolämpötilan keskiarvo alittaa +10 °C alkuvuoden aikana tammi-kuusta kesäkuuhun ja vastaavasti loppuvuotena ulkolämpötilan keskiarvon alittaessa +12 °C heinäkuusta joulukuuhun. Tämä laskennan rajausta perustuu oletamaan, että rakennuksien lämmitys aloitetaan ja lopetetaan kyseisten lämpötilarajojen mukaisesti. Lämmitystarvelukuna käytetään yleisimmin S₁₇-lukua, joka kuvastaa vuorokauden keskilämpötilan ja sisälämpötilan +17 °C:n välistä eroa. Lämmitystarveluku lasketaan +17 °C:in sisälämpötilalla, koska rakennuksen sisäisten ja ulkoisten lämpökuormien oletetaan kattavan rakennuksen lämmitysenergian tarpeet +21 °C:seen. (8)

Kiinteistön rakennusautomaatiojärjestelmällä voidaan kerätä ulkolämpötila havainnot tuntisista arvoista vuorokautisiin keskiarvoihin ja liittää mittausarvot kyseisen ajankohdan lämmitystarpeen energiamittaukseen. Nykyaikainen rakennusautomaatiojärjestelmä toimii graafisen käyttöliittymän välityksellä, jota hyödyntämällä voidaan seurata kiinteistön lämmitystarpeita ja ulkolämpötila historiaa. Jos kiinteistön rakennusautomaatiojärjestelmällä ei ole mahdollisuutta kerätä ulkolämpötilan havaintoja, Ilmatieteen laitoksen havaintojen latauspalvelu tarjoaa laajasti erilaisia havaintosuureita liittyen menneisiin säähavaintoihin Suomessa (9).

2.4 Lämmitysenergian kulutuksen normeeraus

Rakennuksen tilojen ja ilmanvaihdon lämmitykseen käytetty lämmitysenergia tulee normeerata, jotta lämmitysenergian kulutuksia voidaan verrata muiden rakennusten lämmitysenergian kulutuksiin vertailukelpoisesti. Jyväskylään normitettu lämmitysenergian kulutus on vertailukelpoinen rakennuksien sijainnista tai eri sääolosuhteista riippumatta. Normitetun lämmitysenergian kulutuksen seuranta on tehokkaan käytön lähtökohta ja voidaan toteuttaa rakennuksen automaatiojärjestelmällä. (8)

Lämmitysenergian kulutuksen normitukseen tarvitaan lämmitysenergian kulu-
tustiedot ja vastaavana ajankohtana vallinnut ulkolämpötila, jotta voidaan laskea
mittaustuloksien ajanjaksolle lämmitystarveluvut päiväkohtaisesti. Lämmitys-
energian kulutuksen normituksessa käytetään laskentakaavoja, jotka ovat saa-
tavissa Motivan sivuilta (10).

Tietyn rakennuksen lämmitysenergian kulutuksen normeeraus vertailukel-
poiseksi eri ajankohtina lasketaan kaavalla 2.

$$Q_{norm} = \frac{S_N \text{ vpkunta}}{S_{toteutunut \text{ vpkunta}}} Q_{toteutunut} + Q_{lämm. käyttövesi} \quad (2)$$

jossa

Q_{norm} on

Rakennuksen normitettu lämmitysenergiankulutus

Q_{toteunut} on	rakennuksen tilojen lämmitykseen käytetty energia
Q_{kok} on	rakennuksen kokonaislämmitysenergian kulutus
$Q_{\text{lämmin käyttövesi}}$ on	käyttöveden lämmittämiseen käytetty energia
S_N vpkunta on	normaalivuoden tai -kuukauden (1991–2020) lämmitystarveluku vertailupaikkakunnalla, °Cvrk
$S_{\text{toteutunut vpkunta}}$ on	toteutunut lämmitystarveluku vuosi- tai kuukausitasolla vertailupaikkakunnalla, °Cvrk

Eri paikkakunnilla sijaitsevien rakennusten lämmitysenergian kulutus saadaan vertailukelpoiseksi, kun normeeraus tehdään Jyväskylään kaavalla 3.

$$Q_{\text{norm}} = k_2 \frac{S_N \text{ vpkunta}}{S_{\text{toteutunut vpkunta}}} Q_{\text{toteunut}} + Q_{\text{lämmin käyttövesi}} \quad (3)$$

jossa

k_2 on paikkakuntaakohtainen korjauskerroin Jyväskylään

Samalla alueella sijaitsevien rakennuksen lämmitysenergian kulutuksen normeeraus tehdään kaavalla 4.

$$Q_{\text{norm}} = k_1 \frac{S_N \text{ vpkunta}}{S_{\text{toteutunut vpkunta}}} Q_{\text{toteunut}} + Q_{\text{lämmin käyttövesi}} \quad (4)$$

jossa

k_1 on paikkakuntaakohtainen korjauskerroin vertailupaikkakuntaan

2.5 IDA ICE -simulointi

IDA Indoor Climate and Energy on IDA ICE -simulointiohjelma, jolla voidaan tuottaa erilaisia rakennuksen energiatehokkuuteen ja kulutukseen liittyviä laskelmia. IDA ICE -ohjelmalla voidaan mallintaa rakennuksen lämmitys- ja jäähdytysenergian kulutus tuntitasolla sekä tutkia koko rakennuksen energiankulutuksen tasetta. IDA ICE -ohjelmisto sisältää lokalisoinnit useaan eri maahan, jotka sisältävät eri maiden energiankulutuksen laskennassa käytettävät säätiedot ja määräykset. (11.)

Opinnäytetyössä IDA ICE -ohjelmistolla simuloidaan rakennuksen lämmityksen ja lämpimän käyttöveden lämmityksen lämmitysenergian tarve, jota verrataan rakennuksen toteutuneeseen kulutukseen. Mitattua ja simuloitua energian kulutusta verrataan keskenään, jotta voidaan optimoida IDA ICE -ohjelmistolla simuloitun lämmitysenergian kulutukseen käytettyjä lähtöarvoja. Simulointimallin optimoidulla lämmitysenergian kulutuksella voidaan tutkia rakennuksen lämmitysenergian ja -tehojen tarpeita sekä optimoida tuotantolaitteistojen koot. IDA ICE -ohjelmistossa lämmityksen tuotantokaavio voidaan mallintaa kokonaisuudessaan vastaamaan oikeaa lämmöntuotanto järjestelmää huomioiden esimerkiksi verkostojen säädöt, rakennuksen käyttöasteen ja sisäilmaolosuhteet. (12.)

IDA ICE -ohjelmalla tehtävässä simuloinnissa voidaan käyttää vakioituja arvoja esimerkiksi rakennuksen sisäisten kuormien ja lämmitysrajojen osalta, jotka on esitetty Ympäristöministeriön asetuksessa uuden rakennuksen energiatehokkuudesta 1010/2017 momenteissa 10 § ja 11 § (3). Kun rakennuksen todellinen energiankulutus lasketaan todellista tilannetta simuloiden, täytyy lähtötietojen olla mahdollisimman vastaavat kuin miten rakennusta oikeasti käytetään. Simulointimallin lämmitysenergian tarpeen optimoinnissa tarkennetaan mm. seuraavia asioita: sisälämpötila, rakennuksen käyttöaste, ilmanvaihtokoneiden aikaohjelmia, rakenneosien lämmönjohtavuuksia ja asetuksen 1010/2017 momenteissa 10 § sekä 11 § mainittuja asioita.

2.6 Rakenteiden lämpöhäviöiden määrittäminen

Rakennuksen rakennusosien lämmönläpäisykerron eli U-arvo kuvastaa, kuinka rakenne vastustaa lämmön siirtymistä rakenteen läpi. U-arvoja käytetään osoittamaan rakenteiden määräystenmukaisuutta, ja mitä suurempi U-arvo on, sitä helpommin lämpö siirtyy rakenteen lävitse. (13, s. 2.) Rakennuksen vaipan U-arvolla on suuri merkitys rakennuksen lämmitysenergian tarpeeseen etenkin vanhoissa rakennuksissa. Suomen rakentamismääräysten mukaan rakenteiden U-arvojen ohjearvot ovat tiukentuneet vuosikymmenien aikana. Vuonna 1949 Etelä-Suomeen rakennettujen betonitalojen ulkoseinien U-arvon vähimmäisvaatimus oli $0,81 \text{ W/Km}^2$, ja tällä hetkellä uudisrakennuksen ulkoseinän U-arvon

vertailuarvo on 0,17 W/Km² Ympäristöministeriön asetuksen uuden rakennuksen energiatehokkuudesta 1010/2017 momentin 24 § mukaisesti. Rakennuksen rakenneosien lämmönjohtavuutta on ohjattu määräyksillä ja asetuksilla, jonka vuoksi esimerkiksi ulkoseinän lämmönjohtavuuden parantamisella on saavutettu yli 75 %:n parannus energiatehokkuudessa verrattuna vuoden 1949 määräysten vähimmäisvaatimukseen nähden. (3; 14, s. 5.)

Rakennuksen vanhojen rakennesuunnitelmien perusteella voidaan arvioida rakenteiden U-arvoja, kun tiedetään rakenteiden paksuudet ja käytetyt rakennuselementit. Simulointimallissa rakennuksen lämpöhäviöt ovat optimoitu vastaamaan toteutuneita lämmitystarpeita. Kaavalla 5 lasketaan yksittäisen rakennusosan lämmönvastus. (15, s. 5.)

$$R = \frac{d}{\lambda} \quad (5)$$

jossa

R on rakennusosan lämmönvastus, m²K/W

d on rakennusosan paksuus, m

λ on ainekerroksen paksuus, W/mK

Kaavalla 6 lasketaan rakenneosan kokonaislämmönvastus R_T. Rakenneosan ulko- ja sisäpintaan kohdistuvat pintavastukset R_{si} ja R_{se}, joiden suuruus riippuu rakenteen asennosta ja mihin suuntaan lämpövirtaa rakenteen läpi. (15, s. 15, 17.)

$$R_T = R_{si} + R_1 + R_n + R_{se} \quad (6)$$

jossa

R_T on rakennusosan kokonaislämmönvastus, m²K/W

R_{si} on sisäpuolinen pintavastus, m²K/W

R_{1..n} on rakenneosan eri aineiden lämmönvastus, m²K/W

R_{se} on ulkopuolinen pintavastus, m²K/W

Kaavalla 7 lasketaan rakenneosan lämmönläpäisykerroin, joka on kokonaislämmönvastuksen käänteisluku. Lämmönläpäisykerroin määritetään erikseen jokaiselle erilaiselle rakennusosalle.

$$U = \frac{1}{R_T} \quad (7)$$

jossa

U on rakennusosan lämmönläpäisykerroin, W/ m²K

Kaavalla 8 voidaan arvioida rakennuksen rakennusosien U-arvojen muutosten vaikutus vuotuisen lämmitysenergian tarpeeseen (16, s. 76).

$$Q' = \frac{S_{17} 24 \frac{h}{d} dU A}{1000} \quad (8)$$

jossa

Q' on arvio lämpöhäviöiden muutoksesta, kWh

S₁₇ on vuosittainen lämmitystarveluku, °CVrk

dU on rakenneosan U-arvon muutos, W/m²K

A on rakennuksen pinta-ala, m²

3 Lähtötiedot

3.1 Laskennassa käytetty esimerkkirakennus

Opinnäytetyön laskentakohde sijaitsee Helsingin kantakaupungissa, ja se on rakennettu 1900-luvun alkupuolella. Rakennuksessa on päiväkotia ja kerhotoimintaa. Rakennuksen rakennustyyli mukailee keskiaikaista ja uusgoottilaista kirkkoa sekä keskiaikaista kaupunkilaistaloa. Päärakennuksessa on neljä maanpäällistä kerrosta ja sisäpihalla olevassa piharakennuksessa on kaksi maanpäällistä kerrosta sekä ullakko. Rakennuksien yhteispinta-ala on 3 300 m². (17.)

Rakennusta on saneerattu 1900-luvun aikana useamman kerran. Kokonaisvaltainen saneeraus tullaan toteuttamaan vuosina 2023–2026, minkä jälkeen rakennuksen käyttötarkoitus on päiväkotitoimintaa (17). Opinnäytetyössä tarkastellaan rakennuksen toteutuneen ja simuloidun lämmitystarpeen yhtenäistämistä. Mittaustuloksien ja simulointimallin lämmitystarpeiden yhtenäistämällä optimoidaan simuloidun mallin lähtötietoja ja tarkastellaan rakennuksen lämmitystarpeen jakautumista sekä huipputehoja. Lämmitystarpeiden tarkastelu tukee energiasuunnittelijan mitoitusperusteita, kun vertaillaan eri lämmöntuotanto- ja lämmönjakojärjestelmien soveltuvuutta.

Kuvassa 1 on esitetty Excel-taulukon lähtötietovälilehden rakenne. Laskentaan tarvitaan rakennuksen mittaustuloksien mittaussajankohta ja vastaavan ajan lämmitystarve. Lämmitystarpeen jakautuminen saadaan raportoitua simulointimallista huomattavasti tarkemmin kuin rakennuksen toteutuneet lämmitystarpeet. Tämän vuoksi simulointimallin lämmitystarve päädyttiin jakamaan kahteen osaan, tilojen ja ilmanvaihdon sekä käyttöveden ja kiertojohdon lämmitystarpeisiin. Laskentojen yksinkertaistamiseksi lämmitystarpeet on esitetty tehona (kW), joka on saatu tuntisesta lämmitystarpeesta (kWh).

TOTEUTUNUT	Aikaleima	Lämmitystarve (kW)	Ulkolämpötila (°C)	SIMULOITU	h	Tila+HV, W	LKV, W	Ulkolämpötila (°C)	Lämmitys yhteensä
OHJE				OHJE	0	78131,2	2908	-1,1	81
	1.1.2021 0:00	84	-1,1		1	79169,7	2908	-1,2	82
	1.1.2021 1:00	84	-1,2		2	79953,8	2908	0	83
	1.1.2021 2:00	84	0		3	79885,6	2908	0,4	83
	1.1.2021 3:00	83	0,4		4	80913,7	2908	1	84
	1.1.2021 4:00	80	1						

Kuva 1. Rakennuksen lähtötietotaulukko, jossa vasemmalla on mitattu lämmitystarve ja oikealla simulointimallin lämmitystarve tuntikohtaisesti.

3.2 Toteutunut lämmitysenergian kulutus

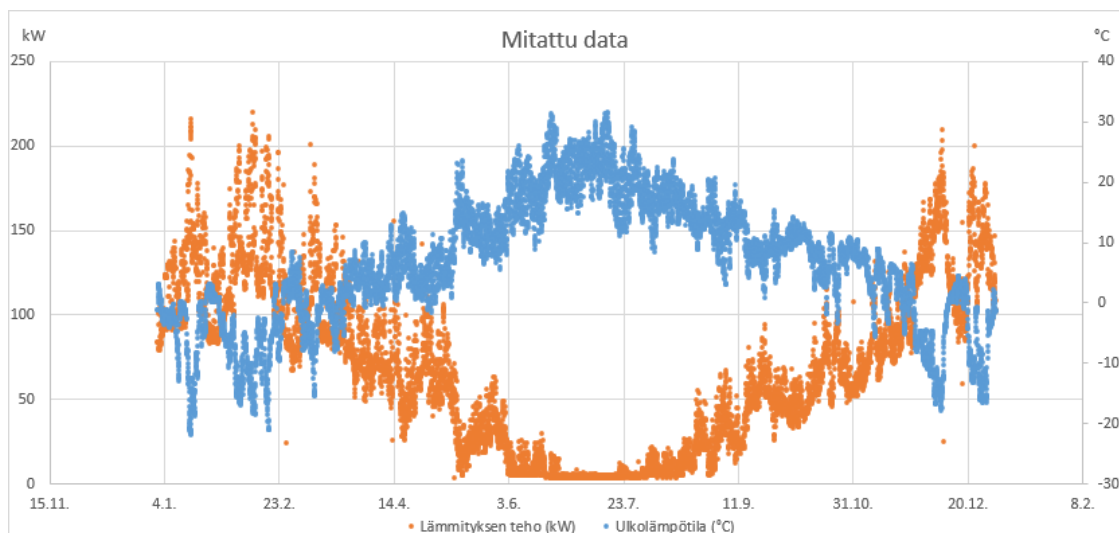
Laskentataulukon lähtötietona tarvitaan rakennuskohteen toteutunut lämmitysenergian kulutus, joita käytetään opinnäytetyön laskelmissa. Lähtötietoina on rakennuksen kaukolämmön kulutustiedot 2021 vuodelta, jotka on mitattu kaukolämpöyhtiöt energiamittarilla. Lämmitysenergiakulutustietoja on käsiteltävä ensin, jotta laskentasoluissa ei ole tyhjiä kohtia. Kaukolämmön mittaustuloksissa

tulee olla vuoden kaikki 8 760 tunnit (karkausvuotta lukuun ottamatta) ja vastavilta ajankohdilta lämmitysenergia sekä ulkolämpötila. Jos joltain tunnilta puuttuu lämmitysenergian tai ulkolämpötilan mittausrarvo, voidaan puuttuvan solun arvo täyttää laskemalla keskiarvo edellisen ja seuraavan solun arvon perusteella. Lämmitysenergia muutetaan tehoksi jakamalla energia ajalla, joka tässä tapauksessa on yksi tunti.

Toteutuneessa lämmitysenergian mittaustuloksissa ei ollut mukana ulkolämpötilan arvoja. Toteutuneet tuntikohtaiset ulkolämpötilat on haettu rakennuksen lähimmältä Ilmatieteen laitoksen havaintoasemalta. (9)

Lähtötiedoista on tehty kuva, jossa on esitetty lämmitystehon ja ulkolämpötilan mittausrarvot päivämäärän mukaan. Kuvaajasta nähdään mittaustietojen lämmitysenergian käyttöprofiili ja se, onko mittaustuloksissa selviä mittausrarvoeroja. Poikkeamat mittaustuloksissa voivat johtua esimerkiksi poikkeavasta lämmitysenergian käytöstä, mittausrarvoeroista tai tiedonsiirtohäiriöstä.

Kuvassa 2 on esitetty lämmitystehon mittaustulosten vaihtelu eri ulkoilman lämpötiloissa. Epäjohdon mukaiset mittausrarvot muutetaan vastaamaan edellisen ja seuraavan mittausrarvon keskiarvoa. Ulkolämpötilan mittausrarvot ovat linjassa, ja mittaustuloksissa ei ole selviä poikkeamia.



Kuva 2. Mitattu tuntikohtainen rakennuksen lämmitysteho ja ulkolämpötila vuonna 2021.

Taulukossa 1 on esitetty mittaustuloksien toteutuneet lämmitystarpeet kuukausitasolla ja kuukauden ulkolämpötilan keskiarvo. Taulukossa esitetyt lämmitystarpeet ovat käsittelemättömiä.

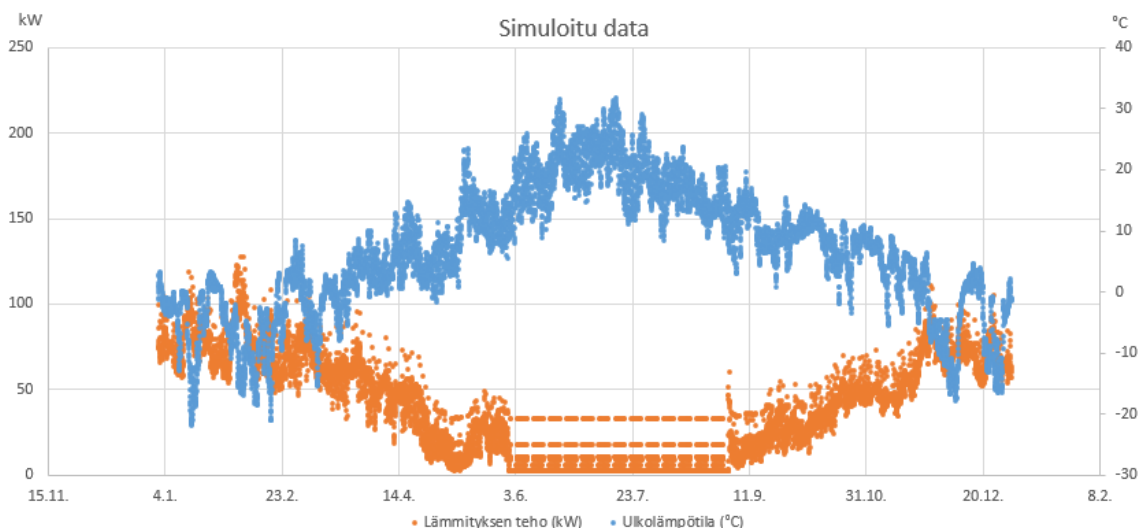
Taulukko 1. Mittaustuloksien käsittelemättömät kuukausittaiset lämmitystarpeet ja ulkolämpötilan keskiarvo.

Toteutunut	Lämmitystarve (kWh)	Ulkolämpötila, ka. (°C)
Tammikuu	85513	-3,9
Helmikuu	89347	-7,0
Maaliskuu	73985	-0,3
Huhtikuu	49751	5,0
Toukokuu	30011	10,5
Kesäkuu	6488	19,6
Heinäkuu	3655	21,6
Elokuu	10629	15,9
Syyskuu	32383	10,1
Lokakuu	44665	8,3
Marraskuu	66273	2,2
Joulukuu	101059	-5,9
Yhteensä	593758	6,4

3.3 Simulointimalli

3.3.1 Simuloitu lämmitysenergian kulutus

Simuloitua lämmitysenergia kulutusdataa ei lähtökohtaisesti tarvitse käsitellä, koska se on tuotettu simulointi ohjelmistolla, jossa laskenta suoritetaan yhden tunnin aika-askeleella. Simuloinnin lähtötietona tarvitaan mahdollisimman tarkat tiedot rakennuksesta, jotta simuloitu lämmitysenergian kulutus saadaan vastaavaksi kuin toteutunut lämmitysenergian kulutus. Kuvassa 3 on esitetty simulointimallin lämmitysteho ja ulkolämpötila päivämäärän mukaan. Kuvasta voidaan erottaa helposti yksittäiset mittauspisteet, kun laskennan aika-askel on yksi tunti.



Kuva 3. Simuloitu tuntikohtainen rakennuksen lämmitysteho ja ulkolämpötila vuonna 2021.

Taulukossa 2 on esitetty simulointimallin lämmitystarpeet kuukausitasolla ja vastaavasti ulkolämpötilan keskiarvo. Simulointimallin lähtötiedot on pyritty määrittämään mahdollisimman tarkasti tilaajan lähtötietojen, kohdekäynnin ja rakennuksen vanhojen suunnitelmien perusteella, jotta simulointimallin lämmitystarve vastaisi todellista tarvetta.

Taulukko 2. Simulointimallin kuukausitason lämmitystarpeet ja ulkolämpötilan keskiarvo.

Simulointi	Lämmitystarve, tila+iv (kWh)	Lämmitystarve, lkv (kWh)	Ulkolämpötila, ka. (°C)
Tammikuu	62291	5329	-3,9
Helmikuu	59082	4707	-7,0
Maaliskuu	51802	5051	-0,3
Huhtikuu	28261	5122	5,0
Toukokuu	10093	5329	10,5
Kesäkuu	893	4847	19,6
Heinäkuu	20	5329	21,6
Elokuu	429	5192	15,9
Syyskuu	12024	4984	10,1
Lokakuu	27554	5329	8,3
Marraskuu	44443	4984	2,2
Joulukuu	55854	5192	-5,9
Yhteensä	352746	61396	6,4

Simulointimallista tilojen ja ilmanvaihdon lämmitystarpeet sekä lämpimän käyttöveden lämmitystarpeet saadaan erillään taulukkomuodossa. Lämmitystarpeet on laskettu simulointimallin lähtötietojen mukaisesti ja tuloksia verrataan toteutuneisiin lämmitystarpeisiin. Lämmitystarpeiden vertailulla nähdään, kuinka simulointimallin lähtötietoja täytyy optimoida, jotta toteutunut ja simuloitu lämmitystarve vastaavat kuukausitasolla.

3.3.2 Simuloidun rakennuksen lähtötiedot

Simulointiohjelmalla mallinnetaan todellisesta rakennuksesta digitaalinen kaksoinen, jota hyödyntäen tutkitaan, kuinka erilaiset energiatehokkuuden parannuksen vaikuttavat rakennuksen vuosittaiseen lämmitystarpeeseen. Rakennus mallinnetaan simulointiohjelmaan niin tarkasti kuin se on resurssien puitteissa mahdollista, jotta rakennus käyttäytyy energialaskelmissa kuten oikea rakennus. Vanhoista rakennuksista on usein vähän suunnitelmia saatavilla, kuten rakennesuunnitelmia, joissa on esitetty eri rakenneosien tyypit. Rakenneosien tyyppikuvilla määritetään esimerkiksi seinärakenteiden U-arvo.

Mallinnetun rakennuksen lähtötietoja on haastava saada täysin vastaamaan oikean rakennuksen tietoja lähtötietojen ollessa puutteellisia. Yleensä rakennuksen käyttäjiltä pyydetään informaatiota rakennuksen käyttöajoista ja tottumuksista, koska energiasuunnittelija käyttää puuttuvilta osin energialaskennassa yleisesti käytettyjä olettamuksia. Rakennuksen lähtötiedot kirjataan simulointiohjelmaan mahdollisimman tarkasti, mutta hyvin harvoin etenkin vanhoissa rakennuksissa syötetyt arvot eivät täsmää todellisten arvojen kanssa. Lähtötietoja, esimerkiksi rakennuksen rakenneosien U-arvoja, muuttamalla rakennuksen simuloitu lämmitysenergian kulutus pyritään täsmäyttämään toteutuneeseen, minkä jälkeen simulointimalli on kalibroitu. Kalibroidulla simulointimallilla voidaan tutkia tulevien muutoksien vaikutusta esimerkiksi rakennuksen lämmitys- tai jäähdytysenergian tarpeeseen. (18)

4 Simuloidun ja toteutuneen lämmitystarpeiden analysointi

4.1 Lämpimän käyttöveden kiertojohdon lämmitystarpeen määrittäminen mittaustuloksista

Toteutuneesta lämmitysenergian mittaustuloksista täytyy erottaa käyttöveden kiertoon käytetty lämmitysenergia. Aiemmin esitetystä kuvasta 2 voidaan nähdä, että lämmityksen teho on kesäkuukausien aikana vähäisintä. Taulukkolaskennan avulla voidaan tarkastella kesä-, heinä- ja elokuun pienintä lämmitystehon tarvetta ja lämmitysenergian kulutusta. Taulukossa 3 on esitetty jokaisen kuukauden pienin lämmitystarve ja kuukauden keskilämpötila.

Taulukko 3. Mittaustuloksien tunnitaiset lämmitystehon minimiarvot eri kuukausina ja ulkolämpötilan kuukauden keskiarvo.

Toteutunut	Lämmityksen teho, min (kW)	Ulkolämpötila, ka. (°C)
Tammikuu	79	-3,9
Helmikuu	67	-7,0
Maaliskuu	50	-0,3
Huhtikuu	26	5,0
Toukokuu	4	10,5
Kesäkuu	4	19,6
Heinäkuu	4	21,6
Elokuu	4	15,9
Syyskuu	12	10,1
Lokakuu	33	8,3
Marraskuu	52	2,2
Joulukuu	84	-5,9
Yhteensä		

Kesä-, heinä- ja elokuun aikana pienin mitattu lämmityksen teho tunnin ajanjaksoilla on ollut 4 kW ja voidaan olettaa, että teho on käytetty lämpimän käyttöveden kiertoon. Tunnittaisesti mitattu lämmityksen teho 4 kW esiintyy mittaustuloksissa useasti kesäkuukausien aikana, kun ulkolämpötila on korkeahko. Ulkolämpötila on ollut kesäkuukausien aikana keskimäärin +15,9...21,6 °C, mikä viittaa lämmitystarpeen olleen vähäinen.

Taulukossa 4 on mittaustuloksien lämmityksen tuntisista lämmitystehoista eroteltu lämpimän käyttöveden kiertojohdon lämpöhäviöihin käytetty lämmitysteho.

Taulukko 4. Mittaustuloksista eritelty käyttöveden kiertojohdon lämpöhäviöihin käytetty lämmitysteho.

Toteutunut	Lämmitysteho, tila, min (kW)	Lämmitysteho, lkv (kW)	Ulkolämpötila, ka. (°C)
Tammikuu	75	4	-3,9
Helmikuu	63	4	-7,0
Maaliskuu	46	4	-0,3
Huhtikuu	22	4	5,0
Toukokuu	0	4	10,5
Kesäkuu	0	4	19,6
Heinäkuu	0	4	21,6
Elokuu	0	4	15,9
Syyskuu	8	4	10,1
Lokakuu	29	4	8,3
Marraskuu	48	4	2,2
Joulukuu	80	4	-5,9
Yhteensä			

Taulukossa 5 on esitetty simulointimallin tuntiset pienimmät lämmitystehot kuu-kauden aikana sekä lämpimän käyttöveden ja kiertojohdon lämmitystehon tarve.

Taulukko 5. Simuloitu lämpimän käyttöveden ja kiertojohdon lämpöhäviöiden tarvitsema lämmitysteho.

Simuloitu	Lämmitysteho, tila, min (kW)	Lämmitysteho, lkv (kW)	Ulkolämpötila, ka. (°C)
Tammikuu	71	4	-3,9
Helmikuu	43	4	-7,0
Maaliskuu	40	4	-0,3
Huhtikuu	10	4	5,0
Toukokuu	0	4	10,5
Kesäkuu	0	4	19,6
Heinäkuu	0	4	21,6
Elokuu	0	4	15,9
Syyskuu	0	4	10,1
Lokakuu	13	4	8,3
Marraskuu	34	4	2,2
Joulukuu	68	4	-5,9
Yhteensä			

Toteutuneesta mittaustuloksista arvioitu 4 kW:n lämmitysteho lämpimän käyttöveden kiertojohtoon lämpöhäviöihin on suurempi kuin simulointimallin arvioitu lämmitysteho. Kaavalla 1 lasketaan tarkastukseksi simulointimallin lämpimän käyttöveden kiertojohtoon uusi lämpöhäviö, jotta lämpimän käyttöveden kiertojohtoon tehot vastaavat ja lähtötiedot vastaavat toteutusta. Lämpimän käyttöveden kiertojohtoon lämmitystarpeen osalta simulointimallia optimoidaan asettamalla arvioitu arvo yksikössä kWh/m².

$$Q_{lkv,kierto} = \frac{\left(6 \frac{W}{m} (0,2 \frac{m}{m^2} 3300m^2)\right)^{24} \frac{h}{vrk} \frac{365}{1000} vrk}{8760 h} = 3,96 kW \quad (1)$$

4.2 Lämpimän käyttöveden lämmitystarpeen määrittäminen mittaustuloksista

Mittaustuloksien lämmitystehon tarpeesta on vähennetty lämpimän käyttöveden kiertoon käytetty lämmitysenergia, jolloin kokonaislämmitystarve sisältää tilojen ja ilmanvaihdon lämmitysenergian sekä lämpimän käyttöveden lämmitysenergian ilman kiertojohtoon lämmitystarvetta. Lämmitysenergian koko kulutuksesta voidaan arvioida lämpimän käyttöveden lämmitysenergian kulutus, kun tarkastellaan kesä-, heinä- ja elokuun lämmitysenergian tarpeita. Taulukossa 6 on esitetty kesäkuukausien lämmitystarpeet, joista on poistettu lämpimän käyttöveden kiertojohtoon lämmitysenergia.

Taulukko 6. Kesäkuukausien lämmitysenergian tarpeet lämpimän käyttöveden lämmitystarpeen arviointiin (taulukossa alimmaisena keskimäärin kuukaudessa).

Lämpimänkäyttöveden lämmitysenergian kulutuksen arviointi	Lämmitystarve ilman LKV kiertoa (kWh)
Kesäkuu	3608
Heinä	679
Elokuu	7653
Summa	11940
Per kuukausi (ka.)	3980

Kesä-, heinä, ja elokuun aikana lämmitykseen on käytetty mittaustulosten perusteella 11 940 kWh, jonka voidaan olettaa olevan lähinnä lämpimän käyttöveden lämmitystarvetta, kun kesäkuukausien aikana tilojen lämmitystarve on vähäistä. Kesäkuukausien lämpimän käyttöveden kokonaislämmitystarpeesta saadaan kuukautiseksi keskiarvoksi 3 980 kWh/kk, jota käytetään simulointimallissa lämpimän käyttöveden kulutuksen lämmitystarpeena. Tässä oletetaan, että lämpimän käyttöveden kulutus on jakautunut tasaisesti eri kuukausille, kulutus noudattaa arkipäivinä samalaista käyttöprofiilia ja kesäkuukausien lämpimän käyttöveden käyttö ei eroa merkittävästi muiden kuukausien kulutuksesta.

Ympäristöministeriön asetuksessa uuden rakennuksen energiatehokkuudesta 1010/2017 momentissa 12 § on esitetty vakioituja nettoarvoja lämpimän käyttöveden lämmitysenergian kulutuksesta, joilla saadaan arvioitua käyttöveden lämmitysenergian kulutusta ja verrattua arvioitua lämmitystarpeen oikeellisuutta. Opinnäytetyön esimerkkirakennus kuuluu käyttötarkoitusluokkaan 6, jolloin sen vakioituun käyttöön perustuva lämpimän käyttöveden vuosittainen laskennallinen nettolämmitystarve on 11 kWh/(m²a). Rakennuksen pinta-ala on 3 300 m², jolloin nettolämmitystarpeen kertoimella saadaan 36 300 kWh/a. Mittaustuloksien perusteella arvioitu vuosittainen käyttöveden lämmitystarve on 47 760 kWh/a, joka on 32 % suurempi lämmitystarve kuin laskennallinen nettolämmitystarve.

4.3 Lämmitysenergian kulutuksen normeeraus normaalivuoteen

Mittaustuloksien ja simulointimallin lämmitysenergian tarpeet tilojen ja ilmanvaihdon lämmitystarpeen osalta normeerataan, jotta vuosittainen ja kuukausittaiset lämmitysenergian tarpeet ovat vertailukelpoisia keskenään. Normeeraus tehdään kaavalla 2 ja toteutuneen mittaustuloksien tammikuu on laskettu esimerkkinä. Kaavassa 2 käytetyt kertoimet ovat saatavissa Ilmatieteen laitoksen lämmitystarve-sivustolta (19). Rakennus sijaitsee Helsingin kantakaupungin alueella ja lämmitystarpeen vertailuarvo on 624 °C_{Vrk}, joka on Helsingin vuosien 1991–2020 keskimääräinen lämmitystarveluku. Mittaustuloksien ulkolämpötilo-

jen arvoista lasketaan lämmitystarveluku ja saatiin 649 °Cvrk. Rakennuksen tilojen ja ilmanvaihdon lämmitystarve 78 481 kWh saatiin, kun vuosittaisesta lämmitystarpeesta vähennettiin lämpimän käyttöveden ja kiertojohdon arvioitu lämmitystarve. Kuukauden normitettuun lämmitystarpeeseen summataan lämpimän käyttöveden ja kiertojohdon kuukausittainen lämmitystarve 7 032 kWh ilman normitusta.

$$Q_{norm,tammikuu} = \frac{624^{\circ}Cvrk}{649^{\circ}Cvrk} 78\,481\,kWh + 7\,032\,kWh = 82\,545\,kWh \quad (2)$$

Taulukossa 7 on eritelty mittaustuloksien eri kuukausien lämmitystarve normitettuna (Q_{norm}), tilojen ja ilmanvaihdon lämmitystarve normitettuna ($Q_{norm,lämmitys}$) ja käyttöveden lämmitystarve, joka sisältää kiertojohdon lämmitystarpeen. Taulukoon on laskettu kuukausittaiset lämmitystarvelukujen kertoimet, jotka kuvastavat rakennuksen tilojen lämmitystarvetta suhteessa normaalivuoden lämmitystarvelukuun. Suurempi kuin ykkönen tarkoittaa, että lämmitystarve on ollut suurempi normaalivuonna kuin lämmitystarpeiden mittaussajanjaksona. Kun kerroin on nolla tai lähes nolla, tämä tarkoittaa, että lämmitystarve on ollut vähäistä tai ei yhtään.

Taulukko 7. Mittaustuloksien lämmitysenergian kulutus normeerattu normaalivuoden säädädataan.

Mittaustiedot	S(N,vpkunta)/ S(toteutunut,vpkunta)	Qnorm (kWh)	Qnorm,lämmitys (kWh)	Qkv (kWh)
Tammikuu	0,96	82545	75512	7032
Helmikuu	0,88	79096	72744	6352
Maaliskuu	1,03	75769	68746	7023
Huhtikuu	1,07	52742	45937	6805
Toukokuu	1,35	38046	31060	6986
Kesäkuu	0,00	4826	0	4826
Heinäkuu	0,00	3644	0	3644
Elokuu	0,93	10300	4153	6147
Syyskuu	0,54	20527	13722	6805
Lokakuu	1,16	50727	43695	7032
Marraskuu	0,99	65449	58644	6805
Joulukuu	0,77	79788	72756	7032
Summa	0,94	563459	486969	76490

Taulukkolaskennalla ja tunnin ajanjaksoilla lämpimän käyttöveden ja kiertojohdon lämmitystarpeeksi saadaan 76 490 kWh/a. Laskennallisesti arvioidulla lämmitys tarpeilla saadaan 82 800 kWh/a ja lämmitystarpeiden erotus on 6 310 kWh/a.

$$Q_{lkv} = 3980 \frac{kWh}{kk} 12 \frac{kk}{a} + 4 \frac{kWh}{h} 8760 \frac{h}{a} = 82\,800 \frac{kWh}{kk}$$

Ero lämmitystarpeissa johtuu pääasiassa rakennuksen käyttöveden kulutuksen jakautumisesta, koska laskennoissa yksinkertaistetaan lämmitystarpeen jakautuminen kuukausitasolla ja todellinen lämpimän käyttöveden kulutus voi vaihdella suuresti saman tunnin aikana eri vuorokausina. Tästä syystä taulukkolaskennassa osa käyttöveden lämmitystarpeesta jää huomioimatta.

Taulukossa 8 on eritelty mittaustuloksien lämmitystarve kuukausittain normitettuna (Q_{norm}), tilojen ja ilmanvaihdon lämmitystarve normitettuna ($Q_{norm, lämmitys}$) ja käyttöveden lämmitystarve (Q_{lkv}).

Taulukko 8. Simulointimallin lämmitysenergian kulutus normeerattu normaali-
vuoden säädataan.

Simuloitudata	S(N,vpkunta)/ S(toteutunut,vpkunta)	Qnorm (kWh)	Qnorm,lämmitys (kWh)	Qlkv (kWh)
Tammikuu	0,96	65264	59935	5329
Helmikuu	0,88	56492	51785	4707
Maaliskuu	1,03	58228	53177	5051
Huhtikuu	1,07	35355	30233	5122
Toukokuu	1,34	18889	13560	5329
Kesäkuu	0,00	4847	0	4847
Heinäkuu	0,00	5329	0	5329
Elokuu	0,94	5597	406	5192
Syyskuu	0,54	11455	6471	4984
Lokakuu	1,16	37331	32002	5329
Marraskuu	0,99	48802	43817	4984
Joulukuu	0,77	48414	43222	5192
Summa		396004	334608	61396

Taulukossa 9 on esitetty lämmitystarpeiden normituksessa käytetyt lämmitystarveluvut. Normaali-
vuoden lämmitystarveluku on vuosien 1991–2020 laskennallinen keskiarvo, ja luku täytyy valita Ilmatieteen laitoksen sivuilta rakennuksen

paikkakunnan mukaisesti. Mittaustuloksissa ja simulointimallissa käytetään Ilmatieteen laitoksen Helsingin Kaisaniemen havaintoaseman lämpötilamittauksia vuodelta 2021, koska rakennuksen rakennusautomaatiojärjestelmästä ei ollut saatavilla kohteen ulkolämpötila historiaa. Lämmitystarveluvut on laskettu havaintoaseman päivittäisistä keskilämpötiloista.

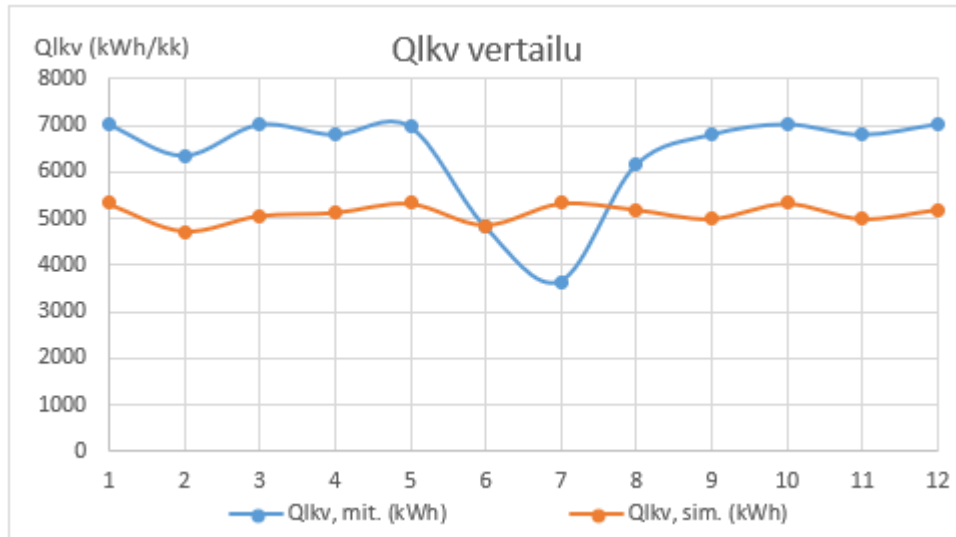
Taulukko 9. Lämmitystarpeiden normituksessa käytetyt lämmitystarveluvut.

	Lämmitystarveluvut 1991 - 2020 (°Cvrk)	Mittausdatan lämmitystarveluku (°Cvrk)	Simulointimallin lämmitystarveluku (°Cvrk)
Tammikuu	624	649	649
Helmikuu	588	671	671
Maaliskuu	549	535	535
Huhtikuu	371	347	347
Toukokuu	148	110	110
Kesäkuu	7	0	0
Heinäkuu	1	0	0
Elokuu	5	5	5
Syyskuu	97	181	180
Lokakuu	313	270	270
Marraskuu	437	443	443
Joulukuu	549	710	709
Vuosi	3689	3919	3919

5 Simulointimallin parametrien optimointi

5.1 Lämpimän käyttöveden ja kiertojohtoon lämmitystarve

Simulointimallin käyttöveden vuosittaisen lämmitystarpeen oli arvioitu lähtötietojen perusteella olevan 9,34 kWh/(m²a), joka vastaa vuosittaisena lämmitystarpeena 30 822 kWh:a. Mittaustuloksien tarkastelun perusteella lämmitystarpeen arvioitiin olevan 3 980 kWh/kk, joka vastaa vuosittaisena lämmitystarpeena lukemaa 47 760 kWh ja rakennuksen pinta-alaan nähden lukemaa 14,47 kWh/(m²a). Pinta-alakohtainen arvioitu käyttöveden lämmitystarve on 55 % suurempi kuin lähtötietosuunnitelmien perusteella arvioitu. Kuvassa 4 on esitetty ensimmäisen optimoinnin jälkeen lämpimän käyttöveden kulutuksen ja kiertojohtoon lämmitystarpeet verrattuna toteutuneisiin mittaustuloksiin.

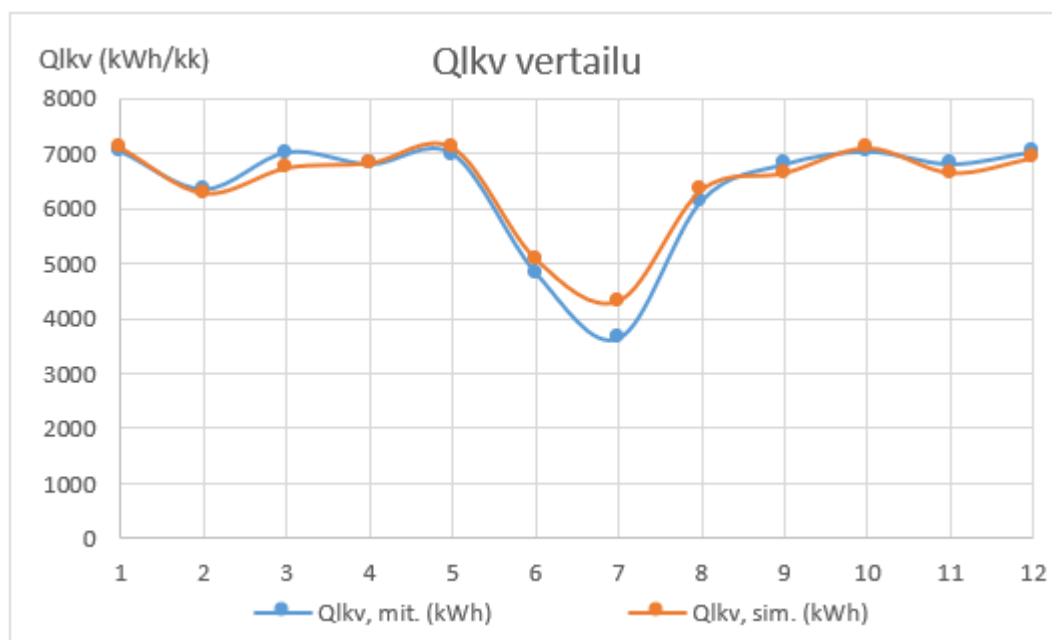


Kuva 4. Simulointimallin optimoidun käyttöveden lämmitystarpeen vertailu mitaustuloksiin. Pystyakselilla kWh ja vaaka-akselilla kuukaudet.

Kuvasta voidaan nähdä, että simulointimallin käyttöveden lämmitystarve on tasainen ympärivuoden. Vertailun mukaan kesäkuukausien aikana käyttöveden lämmitystarve on ollut noin 30 % pienempi kuin toteutunut lämmitystarve. Heinäkuussa lämmitystarve on ollut 30 % suurempi kuin toteutunut lämmitystarve. Loppuvuoden aikana myös simulointimallin lämmitystarve on ollut pienempi kuin toteutunut. Käyttöveden lämmitystarvetta optimoidaan simulointimallissa muuttamalla käyttöveden käytön ajankohtia käyttöaikojen aikatauluun. Aikatauluun voidaan määrittää tarkasti eri tuntiset ja vuorokautiset käyttöajankohdat prosentuaalisesti. Vuosittaista käyttöveden lämmitystarvetta tarkennettiin simulointimalliin taulukon 7 mukaisesti. Mittaustuloksien käyttöveden vuotuisten lämmitystarpeiden tarkastelun mukaan lämmitystarve on vuosittain 41 450 kWh.

$$Q_{lqv.vuosi} = 76\,490 \text{ kWh} - 4 \text{ kW} * 8760 \text{ h} = 41\,450 \text{ kWh}$$

Kuvassa 5 on esitetty simulointimallin optimoitu lämpimän käyttöveden lämmitystarve ja vertailu toteutuneen lämmitystarpeeseen.



Kuva 5. Simulointimallin lämpimän käyttöveden lämmitystarve optimoitu ja vertailu mittaustuloksiin käyttöveden lämmitystarpeeseen. Pystyakselilla kWh ja vaaka-akselilla kuukaudet.

Simulointimallin optimointien jälkeen käyttöveden lämmitystarve vastaa kuukausitasolla tarpeeksi tarkasti mittaustuloksien arvioitua lämmitystarvetta. Simulointimallin lämpimän käyttöveden kiertojohdon lämmitystarve muutettiin 3 kW:sta 3,96 kW:iin, jolloin simulointimallin ja mittaustuloksien pienin mitattu tuntinen lämmitystarve oli yhtä suuri, noin 4 kWh. Lämpimän käyttöveden vuosittainen lämmitystarve muutettiin ensin 47 760 kWh:iin, joka osoittautui liian suureksi. Vuosittaiseksi käyttöveden lämmitystarpeeksi laskettiin 40 500 kWh/a, minkä jälkeen saatiin kuvan 5 mukainen lämmitystarpeiden sopivuus.

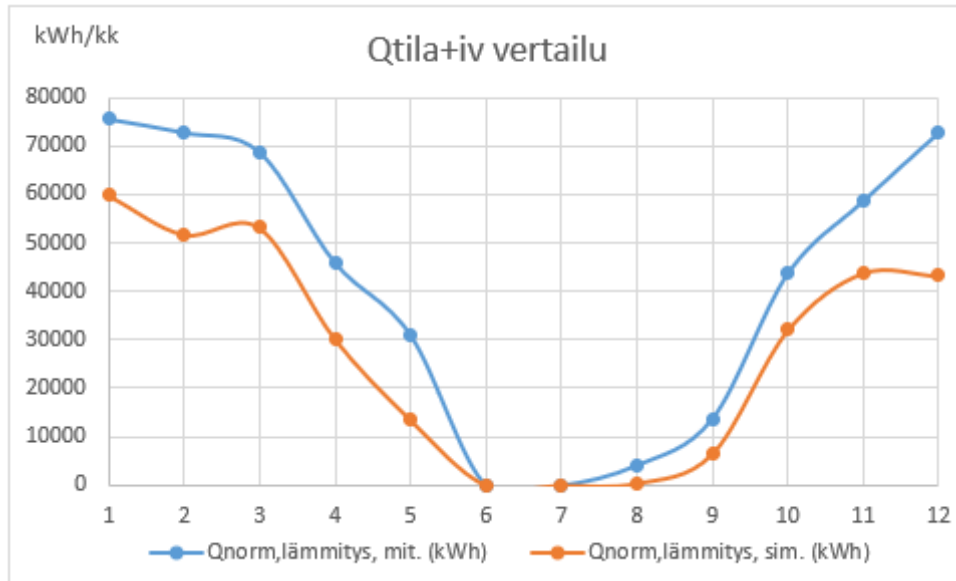
Tästä voidaan päätellä, että tunnin ajanjakso saattaa olla liian epätarkka tarkasteluajanjakso taulukkolaskentaan, koska tuntiset vaihtelut lämmitystarpeessa voivat olla suuria. Lämmitystarvetta täytyi laskea 18 % alkuperäisestä arviosta, minkä jälkeen simulointimallin kuukausittainen käyttöveden lämmitystarve vastaa mittaustuloksien arvioitua tarvetta.

Lämpimän käyttöveden lämmitystarpeen kulutusta voidaan arvioida Motivan ohjeiden mukaan, kun tiedetään rakennustyyppi. Päiväkodille on määritetty, että

kulutuksen oletusarvo on $460 \text{ dm}^3/\text{brm}^2/\text{vuosi}$, joka sisältää käyttöveden lämmitykseen ja kiertojohdon lämmitystarpeen. (20) Käyttöveden kokonaislämmitystarpeeksi saadaan $88\,044 \text{ kWh/a}$ ja, kun tästä erotetaan käyttöveden kiertojohdon vuosittainen lämmitystarve, käyttöveden kulutuksen lämmitystarpeeksi saadaan $53\,354 \text{ kWh/a}$. Lämmitystarve on huomattavasti suurempi kuin simulointimallin optimoitu $40\,500 \text{ kWh/a}$.

5.2 Rakennuksen tilojen ja ilmanvaihdon lämmitystarve

Kuvassa 6 on esitetty tilojen ja ilmanvaihdon lämmitystarpeen vertailu simulointimallin ja toteutuneen mittaustuloksien välillä. Simulointimallin lämmitystarve rakennuksen tilojen ja ilmanvaihdon lämmitykseen eroaa toteutuneista kuukausittaisista lämmitystarpeista systemaattisesti. Alkuvuoden aikana tammikuusta huhtikuuhun simulointimallin lämmitystarve on noin 30 % ja toukokuussa noin 50 % pienempi kuin toteutunut lämmitystarve. Kesäkuusta elokuuhun asti rakennuksen tiloja palvelevan lämmönjakoverkoston kesäsulku oli suljettu lähtötietojen perusteella, jolloin kesäkuukausina tarvittava lämmitystarve oli ilmanvaihdon lämmitykseen. Rakennuksen ilmanvaihdon lämmitysverkosto on toteutettu omana lämmitysverkostona erillään tilojen lämmitysverkosta. Loppuvuodesta simulointimallin lämmitystarve oli syyskuun ja joulukuun osalta 45 % pienempi sekä lokakuun ja marraskuun osalta 25 % pienempi.



Kuva 6. Rakennuksen tilojen ja ilmanvaihdon simuloitun lämmitystarpeen vertailu toteutuneeseen mittaustuloksiin. Pystyakselilla kWh ja vaaka-akselilla kuu-kaudet.

Rakennuksessa on kaksi erillistä ilmanvaihtojärjestelmä, joista vain ilmamäärällisesti suuremmissa on lämmöntalteenotto. Suurempi ilmanvaihtokone palvelee pääsääntöisesti päiväkodin ensisijaisina tiloja, joihin sisältyy esimerkiksi leikkihuoneet, ryhmätilat, toimistot ja neuvottelutilat. Pienempi ilmanvaihtojärjestelmä, jossa ei ole lämmöntalteenottoa, palvelee ensisijaisesti toimintaa tukevia tiloja, joiden ilmanpuhtausluokka on 3 tai 4. Lähtötietomateriaaleista saatiin selville tilakohtaiset ilmanvaihtomitoitukset sekä tiedot ilmanvaihtokoneiden lämmöntalteenotoista sekä muista teknisistä tiedoista. Ilmanvaihtokoneen lämmöntalteenoton vuosihyötysuhde 40 % asetettiin simulointimallin lähtötietoihin. Ilmanvaihtokoneiden käyntiajat saatiin rakennusautomaatiojärjestelmä, ja ilmanvaihtokoneiden käyntiajat olivat täydellä teholla päivällä klo 6–19 välillä ja puolella teholla klo 19–6. Ilmanvaihtojärjestelmien ohjaukseen oli asetettu ilmamäärien puolitus, kun ulkoilman lämpötila on $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ tai kylmempi. Pakkaspudotus on ollut yleisesti käytössä vanhoissa rakennuksissa, jolla on pyritty rajoittamaan lämmitystarpeen huippua kovilla pakkasilla.

Lämpimän käyttöveden kierron lämmitystarpeen nosto 3 kW:sta 3,96 kW:iin vähensi rakennuksen tilojen ja ilmanvaihdon lämmitystarvetta. Asetuksen

1010/2017 momentissa 18 § on maininta, että jos lämpimän käyttöveden kiertojohto on rakennuksen vaipan sisäpuolella, täytyy kiertojohdon lämmitystarpeesta 50 % ottaa huomioon rakennuksen lämpökuormissa (3). Laskennallisesti käyttöveden kiertojohdon 3,96 kW:n lämmitystarpeesta huomioidaan 1,98 kW rakennuksen huonetilojen lämpökuormina.

Rakennuksen rakenneosien ja muiden lämpöhäviöihin vaikuttavien tekijöiden arviointi on haastavaa vanhojen rakennuksien osalta, kun lähtötiedot ovat puutteelliset ja rakennukselle voi olla toteutettu useampi korjaushanke sen elinkaaren aikana. Rakenneosien lämmönjohtavuudet arvioitiin rakennepaksuuksien ja vanhojen rakennuksien tyypillisten suunnitteluarvojen mukaisesti, kun rakennus on toteutettu Helsinkiin 1900-luvun alkupuolella. Rakennuksen eri rakenneosien lämmönjohtavuuksien ei tarvitse olla absoluuttisia, koska lämmönjohtavuuden arvot vaikuttavat rakennuksen kokonaislämmitystarpeeseen. Simulointimallissa lämmönjohtavuudet ovat yleensä arvioituja arvioita, jolloin esimerkiksi seinän U-arvo voi olla todellista parempi ja vastaavasti ylä- tai alapohjan lämmönjohtavuus voi olla huonompi. Lämmönjohtavuuksien kokonaisuus merkitsee enemmän rakennuksen lämmitystarpeen laskennassa kuin tietyn rakenneosan U-arvon todellinen arvo.

Rakennuksen rakenneosien U-arvot valittiin Energiatodistusoppaan 2018 liitteen mukaan, kun parempaa lähtötietoa ei ollut saatavilla. Simulointimallissa on useita muuttujia, jotka vaikuttavat rakennuksen lämmitysenergian tarpeeseen ja käsitellään tässä opinnäytetyössä vain muutamia mahdollisia muuttujia esimerkiksi omaisesti. Ulkoseinän U-arvoksi valittiin alustavasti 0,81 W/m²K, joka koostuu muuratusta betoniseinästä sekä betonisesta lämpömuurista (14, s. 5). Simuloinnin tulokset osoittivat, että rakennuksen lämmitystarvetta täytyi kasvattaa toteutuneeseen lämmitystarpeeseen nähden ja rakenteiden lämmöneristävyys oli arvioitu ennakoitua paremmiksi. Lämmitystarpeen kasvattamiseksi ulkoseinän U-arvoa huononnettiin, jotta talvikuukausien aikana lämmitystarve kasvaisi noin 12 000 kWh. Kaavalla 8 lasketaan uuden seinärakenteen tarvittava U-arvo.

$$12\,000\text{ kWh} = \frac{649\text{ °Cd} * 24\frac{\text{h}}{\text{d}} * (U_{uusi} - 0,81)\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} * 3\,300\text{ m}^2}{1000}$$

$$\rightarrow U_{uusi} = 1,05\text{ W/m}^2\text{K} \quad (8)$$

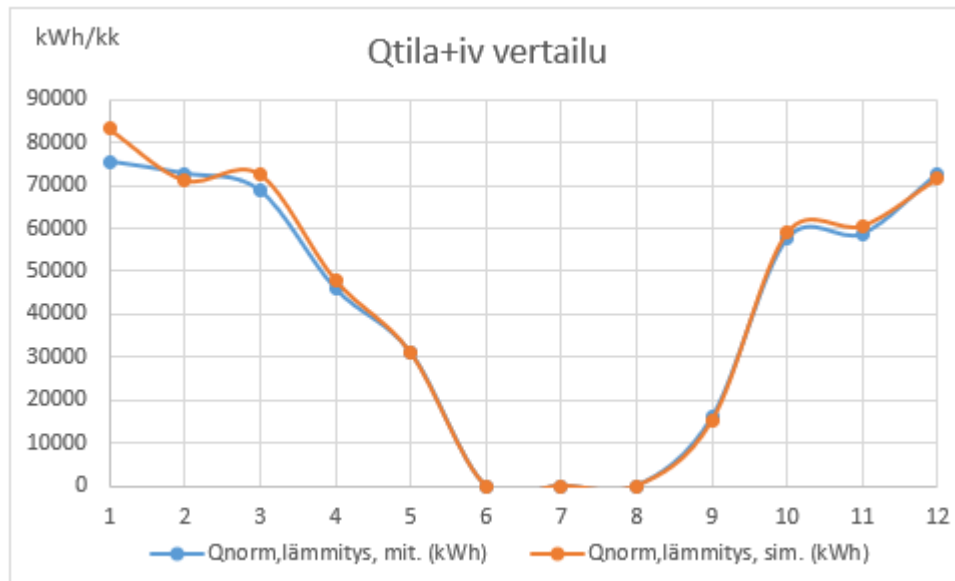
Kaavoilla 5, 6 ja 7 lasketaan seinärakenteen rakenneosien lämmönvastukset ja rakenteen lämmönjohtavuus.

$$1,05\text{ W/m}^2\text{K} = \frac{1}{R_T} \rightarrow R_T = 0,95\text{ m}^2\text{K} \quad (7)$$

$$0,95\text{ m}^2\text{K} = 0,13\text{ m}^2\text{K} + 0,04\text{ m}^2\text{K} + R_1 \rightarrow R_1 = 0,78\text{ m}^2\text{K} \quad (6)$$

$$0,78\text{ m}^2\text{K} = \frac{0,65\text{ m}}{\lambda} \rightarrow \lambda = 0,83\text{ W/mK} \quad (5)$$

Seinärakenteen lämmönjohtavuuden arvolla 0,83 W/mK voidaan tarkastella standardin SFS-EN ISO 10456 + AC lämmönjohtavuuksia ja etsiä lähinnä oleva rakennusmateriaali, joka vastaa lämmönjohtavuudelta laskettua arvoa. Laskennallinen normaali lämmönjohtavuuden ollessa 0,83 W/mK, arvioidaan rakennuksen ulkoseinän olevan kalkkisementttilaastia, kun taulukko arvot ovat 0,65–1,0 W/mK välillä (21). Rakennuksen ulkoseinän U-arvon muutoksen lisäksi simulointimalliin tarkennettiin rakennuksen q₅₀ ilmanvuotolukua, viivamaisten konduktanssien suuruuksia ja yläpohjan lämmönläpäisykerrointa.



Kuva 7. Simulointimallin rakenneosien optimointi tehty ja mallin kuukausittaiset lämmitystarpeet vastaavat toteutuneita lämmitystarpeita. Pystyakselilla kWh ja vaaka-akselilla kuukaudet.

Simulointimallin lämmönjohtavuuksien ja siihen vaikuttavien tekijöiden optimoinnin jälkeen simuloitu lämmitystarve saatiin täsmäämään toteutuneeseen mitaustuloksiin. Taulukossa 10 on esitetty simulointimallin optimoitu lämmitysenergian kulutus. Rakennuksen vuotuinen normitettu lämmitysenergian tilojen ja ilmanvaihdon lämmityksen kasvoi noin 165 000 kWh, kun rakennuksen rakenneosia ja lämpöhäviöihin vaikuttavia suureita optimoitiin. Lämpimän käyttöveden ja kiertojohdon vuotuinen lämmitystarve suureni alkuarvaukseen nähden noin 16 000 kWh.

Taulukko 10. Optimoidun simulointimallin lämmitysenergian kulutus normeeratuna normaalivuoden säähän.

Simuloitudata	S(N,vpkunta)/ S(toteutunut,vpkunta)	Qnorm (kWh)	Qnorm,lämmitys (kWh)	Qlqv (kWh)
Tammikuu	0,96	90203	83105	7098
Helmikuu	0,88	77427	71154	6273
Maaliskuu	1,03	79260	72522	6738
Huhtikuu	1,07	54792	47969	6823
Toukokuu	1,34	38117	31019	7098
Kesäkuu	0,00	5072	0	5072
Heinäkuu	0,00	4319	0	4319
Elokuu	0,94	10703	4363	6340
Syyskuu	0,54	19654	13010	6645
Lokakuu	1,16	51892	44794	7098
Marraskuu	0,99	67167	60522	6645
Joulukuu	0,77	78575	71655	6920
Summa		577182	500114	77068

6 Tulokset ja johtopäätelmät

6.1 Lämpimän käyttöveden ja kiertojohdon lämmitystarpeen määrittäminen

Toteutuneista mittaustuloksista määritelty lämpimän käyttöveden kiertojohdon lämmitystarve oli suurempi kuin lähtötietojen perusteella simulointimalliin oli arvioitu. Mittaustuloksien ja lähtötiedon välinen ero oli 1 kWh, joka kasvattaa vuoden aikana lämmitystarvetta noin 8 760 kWh, ja lämpimän käyttöveden kiertojohdon vuosittainen lämmitystarve oli noin 34 700 kWh.

Lämpimän käyttöveden vuosittainen lämmitystarve arvioitiin kesäkuukausien keskimääräisen lämmitystarpeen mukaan, josta oli poistettu lämpimän käyttöveden kiertojohdon lämmitysenergia. Keskikesän kuukausien käyttöveden lämmitystarve arvioitiin olevan 3 980 kWh/kk, joka oli suurempi kuin määräysten mukainen vakioitu nettolämmitystarve. Rakennuksen lämpimän käyttöveden vuosittainen lämmitystarve syötettiin simulointiohjelmaa ja rakennuksen lämmitystarve tase simuloitiin. Simuloinnin tulokset osoittivat, että arvioitu kuukausittainen lämmitystarve oli keskikesällä liian suuri ja alkuvuodesta liian

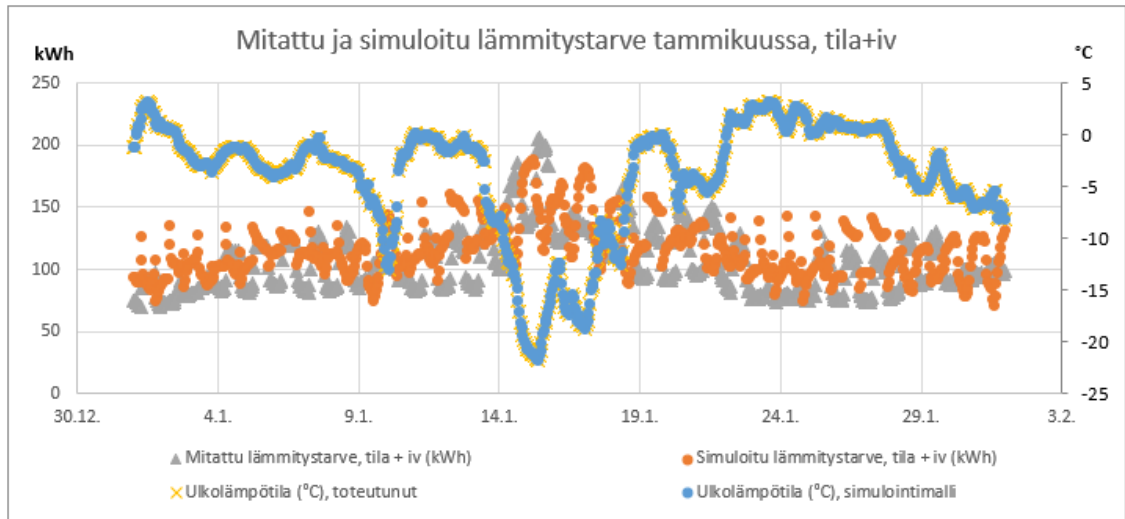
pieni. Simulointimallin käyttöveden aikataulua tarkennettiin tuloksien perusteella ja simuloinnin perusteella lämpimän käyttöveden lämmitystarve oli noin 40 500 kWh/a.

Lämpimän käyttöveden lämmitystarpeen arvioinnissa tulee virhe, koska käyttöveden kulutusta on vaikea ennustaa, ja se on riippuvainen rakennuksen käyttäjistä. Taulukossa 6 on esitetty lämpimän käyttöveden lämmitystarpeet kesäkuukausina. Heinäkuussa on tarkasteluajanjakson pienin lämmitystarve 679 kWh/kk ja suurin löytyy elokuulta 7 653 kWh/kk. Kun mittaustuloksien tunti- sista lämmitystarpeista vähennetään käyttöveden lämmitystarve, saattaa kesäkuukausien aikana lämmitystarve olla pelkästään kiertojohdon lämmitystarve. Ajaudutaan tilanteeseen, jossa oletetaan olevan käyttöveden lämmitystarvetta, mutta oikeasti on vain kiertojohdon lämmitystarve. Tämän takia käyttöveden arvioitu ja simuloitu lämmitystarve eroavat toisistaan.

6.2 Rakennuksen tilojen ja ilmanvaihdon lämmitystarve

Rakennuksen tilojen ja ilmanvaihdon lämmitystarve simulointiin lähtötietojen perusteella ja vertailu toteutuneisiin mittaustuloksiin osoitti, että lähtötietojen mukaan rakenteiden U-arvot olivat liian hyvät, jonka vuoksi simulointimallin lämmitystarve oli huomattavasti pienempi kuin toteutunut. Simulointimallin vuosittaista lämmitystarvetta kasvatettiin muuttamalla rakennusosien U-arvoja huonommaksi. Usean simuloinnin jälkeen vuosittainen lämmitystarve vastasi toteutunutta lämmitystarvetta. Rakennuksen ilmanvaihtojärjestelmän lähtötiedot olivat tarpeeksi tarkat, joten niiden tarkentamiselle ei nähty syytä. Tilojen ja ilmanvaihdon vuosittaista lämmitystarvetta kasvatettiin noin 160 000 kWh.

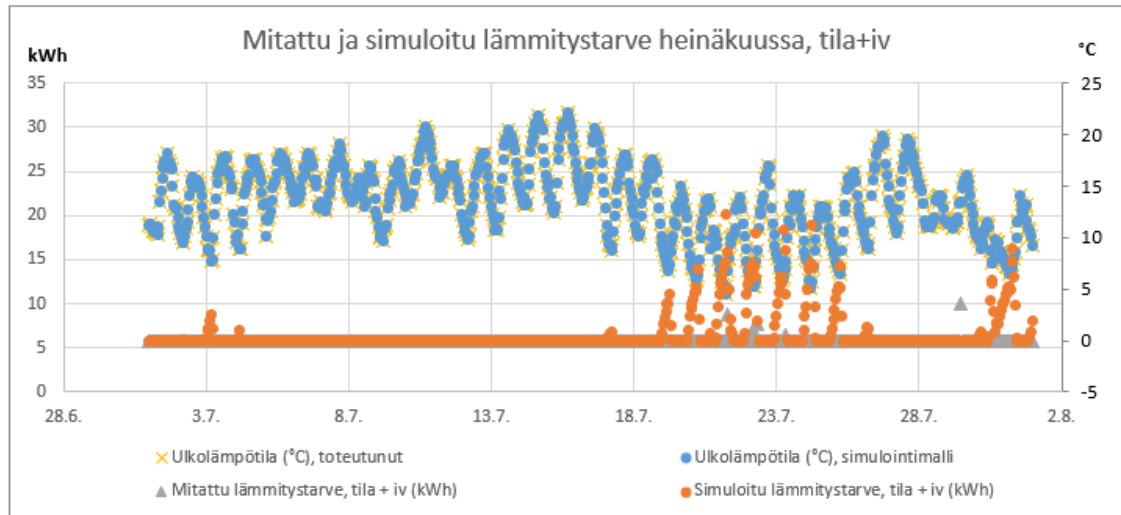
Lämmitystarvetta tarkasteltiin myös tammikuun ja heinäkuun osalta, jotka kuvastavat keskimääräisesti vuoden kylmintä ja lämmintä kuukautta. Kuvassa 8 on esitetty lämmitystarpeiden vertailu tammikuussa.



Kuva 8. Rakennuksen tilojen ja ilmanvaihdon lämmitystarpeiden vertailu tammikuun ajanjaksona.

Kuvasta nähdään, että simulointimallin lämmitystarve kuvastaa toteutunutta lämmitystarvetta ja lämmitystarpeen vaihteluun vaikuttavat tekijät muun muassa rakennuksen käyttöajat ja ilmanvaihdon käyttöajan vastaavat todellista käyttöä. Tammikuun aikana ulkolämpötila pysyi hyvin tasaisena muutamaa kylmempää hetkeä lukuun ottamatta. Kylmempänä ajankohtana lämmitystarve kasvaa selvästi mittaustuloksissa sekä simulointimallissa.

Kuvassa 9 on esitetty lämmitystarpeiden vertailu heinäkuussa. Heinäkuussa lämmitystarve keskittyy käyttöveden ja kiertojohtoon sekä ulkolämpötilan myötä rakennuksen tilojen ja ilmanvaihdon lämmitystarve on vähäistä, kuten oli arvioitu. Kuvasta nähdään, että kun ulkolämpötila on yli +8 °C, lämmitystarve on vähäistä. Ulkolämpötilan alittaessa +8 °C lämmitystarve kasvaa selvästi. Ajanjaksolla 18.7.–28.7. lämmitystarve ajoittuu pääsääntöisesti iltaan ja aamuun, jolloin rakennus ei ole käytössä. Lämmitystarpeen piikit simulointimallissa johtuvat ilmanvaihtokoneen tuuletus toiminnosta, jolla pyritään viilentämään tiloja käyttöaikojen ulkopuolella. Piikkien vuosittainen vaikutus rajoittuu kesäkuukausien ajalle, kun tilojen lämmitysverkoston kesäsulku on kiinni. Vaikutus vuosittaiseen lämmitysenergian kulutukseen on vähäinen, jonka vuoksi käyttöaikatauluja ei tarkennettu.



Kuva 9. Rakennuksen tilojen ja ilmanvaihdon lämmitystarpeiden vertailu heinäkuun ajanjaksona.

6.3 Lämmitystarpeiden käsittely kuukausi ja tuntitasolla

Lämmitystarpeiden käsittely tuntitasolla vaatii, että lämmitystarve on tasaista eikä sisällä ennalta arvaamattomia piikkejä. Käyttöveden kiertojohtoon lämmitystarve on tasaista, johon ei vaikuta ulkolämpötilan muutokset eikä käyttöveden kulutus. Lämpimän käyttöveden kulutus vaihtelee tuntien ja vuorokausien välillä, minkä takia sen kulutusta on vaikea ennustaa simulointimallissa sekä tuntitason laskennassa. Opinnäytetyön tuntitason laskennassa esiintyneet lämmitystarpeiden poikkeamat johtuvat käyttöveden ennakoimattomuudesta. Käyttöveden tuntisissa lämmitystarpeen arvioinneissa ja laskelmissa tulee kriittisesti tarkastella tuloksia sekä vertailla arvoja määräysten viitteellisiin arvoihin.

Rakennetun rakennuksen tilojen ja ilmanvaihdon lämmitystarpeisiin vaikuttaa ulkolämpötila sekä ilmanvaihtolaitteiston käyttöajat. Tilojen lämmityksen pyritään tilassa tiettyyn sisälämpötilaan, kun samanaikaisesti lämpöä johtuu rakenteiden kautta lämpimämmästä tilasta kylmempään. Ilmanvaihtolaitteiston lämmitystarve aiheutuu laitteiston käyttöajoista, ilmamäärästä ja ulkolämpötilasta. Ilmanvaihtokoneella pyritään puhaltamaan vakiolämpöistä ilmaa laitteiston palvelualueelle.

7 Yhteenveto

Työn tavoitteena oli laatia Excel-laskentataulukko Sweco Talotekniikan energia-suunnittelijoille, jotka käsittelevät rakennuksien simuloituja sekä toteutuneita lämmitysenergian tarpeita. Työssä laadittiin Excel-laskentataulukko, jolla laskettiin esimerkki rakennuksen vuosittaisen lämmitystarpeen jakautumista tilojen ja ilmanvaihdon sekä lämpimän käyttöveden välillä toteutuneista mittaustuloksista.

Lämpimän käyttöveden ja kiertojohdon lämmitystarve arvioitiin kesäkuukausien lämmitystarpeen, kun oletettiin kesäkuukausien lämmitystarpeen kohdistuvat ai-noastaan käyttöveteen ja kiertojohtoon. Lämpimän kiertojohdon lämmitystarve arvioitiin kesäkuukausien pieneninten tuntisten lämmitystarpeiden mukaan, joka oli 4 kW. Lämpimän käyttöveden lämmitystarvetta arvioitiin myös kesäkuukau-sien lämmitystarpeiden perusteella ja olettaen, että tilojen ja ilmanvaihdon läm-mitystarve on vähäistä. Kesäkuukausien keskimääräisen lämmitystarpeen arvi-oiitiin olevan 3 980 kWh/kk ja 47 760 kWh/a. Simulointimallin käyttöveden läm-mitystarpeen laskenta osoitti, että vuosittainen arvio lämmitystarpeesta oli liian suuri. Lämmitystarvetta pienennettiin 40 500 kWh/a, minkä jälkeen simulointi-mallin lämmitystarve vastasi toteutunutta lämmitystarvetta.

Toteutuneesta mittaustuloksesta saatiin tilojen ja ilmanvaihdon vuosittainen lämmitystarve vähentämällä lämpimän käyttöveden ja kiertojohdon lämmitystar-peat. Simulointimallin lämmitystarvetta optimoitiin toteutuneen lämmitystarpeen mukaan, jotta simulointimallin kuukausittainen lämmitystarve vastasi toteutu-nutta ja rakennus käyttäytyy lämpöteknisesti kuten todellinen rakennus. Simu-lointimallin tehtiin muutoksia rakennusosien lämmönläpäisykertoimiin, raken-nuksen tiiveyteen, rakennusosien liitoksien konduktansseihin ja ilmanvaihtolait-teiston lämmöntalteenoton vuosihyötysuhteeseen. Simulointimallin optimoitu lämmitystarve kuvastaa toteutunutta lämmitystarvetta koko vuoden aikana ja tammi- sekä heinäkuun tarkasteluajanjaksoina.

Lähteet

- 1 ”Suomella on hyvät mahdollisuudet kestäväen kehityksen mukaiseen ekologiseen jälleenrakentamiseen”. 3.1 Hiilineutraali ja luonnon monimuotoisuuden turvaava Suomi. Marinin hallitus, hallitusohjelma. Verkkoaineisto. Valtioneuvosto. <https://valtioneuvosto.fi/marinin-hallitus/hallitusohjelma/hiili-neutraali-ja-luonnon-monimuotoisuuden-turvaava-suomi>. Luettu 5.2.2023.
- 2 Lämpöenergian mittaus. Verkkoaineisto. Energiavirasto. <https://energiavirasto.fi/lampoenergian-mittaus>. Luettu 5.2.2023.
- 3 Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen energiatehokkuudesta. 1010/2017. 20.12.2017.
- 4 Ilmanvaihto. Verkkoaineisto. Energiatehokaskoti. https://www.energiatehokaskoti.fi/suunnittelu/talotekniikan_suunnittelu/ilmanvaihto. Luettu 5.2.2023
- 5 Vesi- ja viemärlaitteistot -opas, päivitetty 22.6.2022. 8 Lämpimän käyttöveden kiertojohto. Verkkoaineisto. Talotekniikkainfo. <https://talotekniikkainfo.fi/vesi-ja-viemarilaitteistot-opas/8-lampiman-kayttoveden-kiertojohto>. Luettu 11.2.2023.
- 6 Rakennuksen energiankulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskenta. 2017. Energiatehokkuus. Verkkoaineisto. Helsinki. <https://ym.fi/documents/1410903/0/Ohje+-+Rakennuksen+energiankulutuksen+ja+l%C3%A4mmitystehontarpeen+laskenta+20-12-2017.pdf/3efb5c34-e921-592e-3d54-aaf9ecc1b62e/Ohje+-+Rakennuksen+energiankulutuksen+ja+l%C3%A4mmitystehontarpeen+laskenta+20-12-2017.pdf?t=1647934666563>. Luettu 21.3.2023.
- 7 Rakennusten kaukolämmitys, määräykset ja ohjeet. Julkaisu K1/2021. 2022. Verkkoaineisto. Energiateollisuus ry. https://energia.fi/files/6412/Julkaistu_K1_2021_Rakennusten_kaukolammitus_Maaraykset_ja_ohjeet_%28pdf%29.pdf. Luettu 11.2.2023.
- 8 Kulutuksen normitus. 2023. Verkkoaineisto. Helsinki. Motiva. https://www.motiva.fi/julkinen_sektori/kiinteiston_energian kaytto/kulutuksen_normitus. Luettu 11.2.2023.
- 9 Havaintojen lataus. 2022. Helsinki. Verkkoaineisto. Ilmatieteen laitos. <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/havaintojen-lataus>. Luettu 18.3.2023.
- 10 Kulutuksen normitus auttaa kulutusseurannassa. Julkaistu 01/2023. Verkkoaineisto. Motiva. https://www.motiva.fi/files/20935/Motiva_Kulutuksen_normitus_laskentakaavat-ja-ohjeet_01-2023.pdf. Luettu 12.2.2023.

- 11 IDA Indoor Climate and Energy. 2023. Verkkoaineisto. Equa Simulation AB. <https://www.equa.se/fi/ida-ice>. Luettu 13.2.2023.
- 12 Versioiden vertailutaulukko. 2023. Verkkoaineisto. Equa Simulation AB. <https://www.equa.se/fi/ida-ice/editions/comparison-table>. Luettu 18.2.2023.
- 13 Tuikka Jaakko. Seinärakenteiden U-arvon in-situ mitattavuuden laskennallinen arviointi. Tampere. 2019. <https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/10024/118196/TuikkaJaakko.pdf?sequence=2>. Luettu 11.4.2023.
- 14 Tyypillisiä olemassa olevien vanhojen rakennusten alkuperäisiä suunnittelu-arvoja. 2018. Energiatodistusoppaan 2018 liite. Verkkoaineisto. Ympäristöministeriö. https://www.motiva.fi/files/16465/Tyypillisia_olemassa_olevien_vanhojen_rakennusten_alkuperaisia_suunnittelu-arvoja_-_Energiatodistusoppaan_2018_liite.pdf. Luettu 12.4.2023.
- 15 Viivamaisten lisäkonduktanssien laskentaopas. 2012. Ohje rakennusosien välisten liitosten viivamaisten lisäkonduktanssien laskentaan. Verkkoaineisto. Ympäristöministeriö. https://ym.fi/documents/1410903/38439968/Viivamaisten-lisakonduktanssien-laskentaopas-0708E7A2_7EE5_4DA5_AEF2_2801630E2300-30996.pdf/895973ff-752c-fb4c-8496-4f13b954d6c9/Viivamaisten-lisakonduktanssien-laskentaopas-0708E7A2_7EE5_4DA5_AEF2_2801630E2300-30996.pdf?t=1603260205020. Luettu 11.4.2023.
- 16 Ojanen, Tuomo; Nykänen, Esa & Hemmilä Kari. 2017. Rakenteellinen energiatehokkuus korjausrakentamisessa, opas. Verkkoaineisto. https://www.motiva.fi/files/15180/Rakenteellinen_energiatehokkuus_korjausrakentamisessa.pdf. Luettu 11.4.2023.
- 17 Betania-talo. 2022. Verkkoaineisto. Arrak. <https://www.arrak.com/newlocation/betaniatalo.html>. Luettu 4.4.2023.
- 18 Eloranta, Vilppu. 2020. Energijärjestelmien mallinnus tukee rakennusten digitalisaatiota. Verkkoaineisto. LAB Pro. <https://www.labopen.fi/lab-pro/energijarjestelmien-mallinnus-tukee-rakennusten-digitalisaatiota/>. Luettu 12.4.2023.
- 19 Lämmitystarveluku eli astepäiväluku. Helsinki. Verkkoaineisto. Ilmatieteen laitos. <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/lammitystarveluvut>. Luettu 1.4.2023.
- 20 Laskukaavat: Lämmin käyttövesi. 2022. Helsinki. Verkkoaineisto. Motiva. https://www.motiva.fi/julkinen_sektori/kiinteiston_energiankaytto/kulutuksen_normitus/laskukaavat_lammin_kayttovesi. Luettu 10.4.2023.

- 21 SFS-EN ISO 10456 + AC. 2008. Rakennusaineet ja -tuotteet. Lämpö- ja kosteustekniset ominaisuudet. Taulukoidut suunnitteluarvot ja menetelmät ilmoitetun lämpöteknisen arvon ja lämpöteknisen suunnitteluarvon määrittämiseksi. Helsinki. Suomen standardisoimisliitto.