

**MAALÄMPÖPUMPUN AIKAOHJAUKSEN KANNATTA-
VUUS**
**Profitability of time control with a geothermal heat
pump**
Aleksi Koivu

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT
School of Energy Systems
Sähkötekniikka

Aleksi Koivu

Maalämpöpumpun aikaohjauksen kannattavuus

2020

Kandidaatintyö.

31 s.

Tarkastajat: Antti Kosonen, Paula Immonen ja Vesa Ruuskanen

Tämän työn tarkoituksena on tutkia aikaohjauksen kannattavuutta maalämpöpumpun käytössä rakennuksen ja käyttöveden lämmittämisessä. Rakennuksen lämmittämisessä on vertailtu pelkästään yösähkön aikana lämmittämistä ja kolmessa erässä lämmittämistä: kerran yösähkön aikana ja kaksi kertaa päiväsähkön aikana. Saaduilla tuloksilla on selvitetty kannattaisiko Juha Vahvasen opinnäytetyössä (2019) esitettyä omakotitaloa lämmittää aikaohjauksella toteutuneiden Elspot hintojen perusteella, kolmella eri kokoisella varaajalla. Käyttöveden lämmityksessä on tutkittu kuinka paljon kuumemmaksi voi käyttöveden lämmittää aikaohjauksella, kuin ilman aikaohjausta, samoilla lämmityskustannuksilla.

Rakennuksen lämmittämisessä aikaohjaaminen osoittaa potentiaalia mutta kannattavuus riippuu lämpövaraajan lämpökapasiteetista ja tarvittavasta lämpöenergian määrästä. Esimerkkirakennuksella aikaohjaus kannatti vuoden keskimääräisellä lämmitystarpeella kaikilla kolmella betoni varaajalla, mutta huippulämmitystarpeen aikaan aikaohjaus ei kannattanut yhdelläkään varaajalla. Lämmityksessä on myös otettava huomioon betonilattiavaraajan käytettäessä varaajan lämpötila. Lämpötilaa voidaan pienentää kasvattamalla varaajan kokoa. Riittävän suurella varaajalla aikaohjaus kannattaa, ainakin suurimman osaa vuodesta, mutta tässä työssä ei ole huomioitu lämmönsiirtymistä, joka varaajassa tapahtuu, tai lämmönsiirtymistehoa rakennukseen, mikä vaikuttaa sisälämpötilaan. Näiden vaikutus kannattavuuteen vaatii lisätutkimusta.

Käyttöveden lämmittämisessä aikaohjaamisen kannattavuutta tutkittiin kahdella eri veden lämpötilalla. Suomen elspot markkinoiden keskimääräisellä yö- ja päivähintaerolla voidaan vesi yöllä lämmittää noin 12 % kuumemmaksi, mittauksissa käytetyillä pumpun menoveden lämpötiloilla. Kannattavuudessa tulee yöllä lämmittäessä huomioida päivän aikana tapahtuvat lämpöhäviöt ja kompensoida niitä lämmittämällä vesi vastaavasti kuumemmaksi. Tutkimuksessa löydettiin että lämmittäessä 200 litraa, vähintään 55 °C:sta käyttövettä, on pelkästään yöllä lämmittäminen kannattavaa, jos lämpöhäviöiden aiheuttama lämpötilan alenema on alle 6.4 °C. Tulokset vaikuttavat lupaavilta, sillä lämpötilan nousu on huomattava. Kuitenkin ilman laskentaa oikeassa varaajassa tapahtuvista lämpöhäviöistä, ei tämän tutkimuksen valossa voi sanoa onko pelkästään yöllä lämmittäminen kannattavaa.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT
School of Energy Systems
Electrical Engineering

Aleksi Koivu

Profitability of time control with a geothermal heat pump

2020

Bachelor's Thesis.

31 p.

Examiners: Antti Kosonen, Paula Immonen and Vesa Ruuskanen

The purpose of this work is to study the profitability of using time control with ground source heat pumps for heating buildings or hot water. For heating buildings two control methods were studied: producing all heat energy needed with night electricity and producing one third of needed heat energy with night electricity and two thirds with day electricity, with three differently sized storages. With the latter method equal amounts of heat energy were produced with every heating cycle. Then the profitability of using time control was calculated, based on a building presented in the study done by Juha Vahvanen (2019). Elspot prices in 2019 are used for electricity costs. Profitability of heating hot water was studied by calculating how much hotter the water could be heated by using night electricity instead of day electricity.

Time control with building heating shows potential but the profitability depends on the heat capacity of the thermal storage used and the amount of needed heat energy. With the building used, time control was profitable with all three tested concrete thermal storages with the average heating required. However, during peak heating requirement time control wasn't worthwhile with any of them. Temperature of the thermal storage also needs to be considered for user's comfort, when using floor heating. The temperature can be lowered with a bigger storage. With a big enough storage, time control is worthwhile at least most of the year, but this study hasn't accounted thermal transfers that happen inside the thermal storage, or heat transfer rate to the building, which affects the buildings internal temperature. The effect of these on the profitability of time control needs to be studied further.

When heating hot water, the profitability of time control was studied with two different water temperatures. With the average night- and daytime price difference in Finnish Elspot market, you can heat the water about 12 % hotter during nighttime than during daytime with the supply temperatures used in the calculations. When calculating profitability of nighttime heating, heat losses that occur during daytime need to be considered and compensated for by heating the water hotter. In the study, it was found that with a 200 liter hot water storage and with a minimum water temperature of 55 °C, it would be more profitable to only heat at night, if temperature change caused by heat loss is less than 6.4 °C. The results seem promising since the temperature rise is quite substantial. Still, without calculating the heat losses that occur in a real hot water storage, we can't say for sure whether only heating hot water during nighttime is worthwhile.

SISÄLLYSLUETTELO

Käytetyt merkinnät ja lyhenteet

1.	Johdanto.....	7
2.	Fyysisen sähkön Hinnan määräytyminen suomessa.....	8
2.1	Sähkön hinnan muodostuminen Elspot-markkinoilla	8
2.2	Suomen aluehinta Elspot markkinoilla.....	9
2.3	Aikasähkö hinnan vaihtelu Elspot markkinoilla.....	9
3.	Maalämpöjärjestelmän Toiminta	12
3.1	Maalämpöpumpun tehokkuus	13
3.2	COP käyrän laskeminen mittausdatan perusteella.....	13
4.	kannattavuus	16
4.1	Esimerkki kohde	16
4.2	Käytetyn sähköenergian laskenta	16
4.3	Rakennuksen lämmityksen kannattavuus	17
4.4	Käyttöveden lämmittämisen kannattavuus	22
5.	Yhteenveto.....	25
	Lähteet	27

Liitteet

Liite 1. COP pisteet ja COP käyrä.

Liite 2. Esimerkkikohteen lämmitysenergiälaskelma.

KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET

COP	tehokerroin
<i>Päivä hinta</i>	vuorokauden päivä tuntien keskiarvo
<i>Yö hinta</i>	vuorokauden yö tuntien keskiarvo
<i>CM</i>	yö hinnan suhde päivähintaan
<i>T</i>	lämpötila
<i>Q</i>	tuotettu lämpöenergia
<i>W</i>	pumpun tekemä työ
<i>E</i>	sähköenergia
<i>q</i>	tilavuusvirta
<i>P</i>	teho
<i>c</i>	ominaislämpötilakerroin
ρ	tiheys
ΔT	lämpötilaero
<i>C</i>	lämpökapasiteetti
<i>V</i>	tilavuus
<i>p</i>	hinta
Δp	hintaero
$q_{\text{häviö}}$	häviöteho
<i>k</i>	lämmönjohtavuus materiaalissa
<i>A</i>	pinta-ala
<i>L</i>	eristekerroksen paksuus

Alaindeksit

H	kuuma
C	kylmä
el	sähkö
hw	käyttövesi
he	lämmitys energia
out	lähtö
ret	paluu

brine	lämmönkeruuneste
in	tulo
muutos	muutos alku ja loppu lämpötilojen välillä
loppu	loppu lämpötila
0	alku lämpötila
kesk	keskimääräinen
yö	yöllä
päivä	päivällä
ao	aikaohjattu
ilman	ilman aikaohjusta
häviö	häviö lämpö
varaaja	varaajan lämpötila
maa	maan lämpötila

1. JOHDANTO

Maalämpöpumput ovat nopeasti yleistynyt vaihtoehto tuottamaan osa tai kaikki rakennuksen tarvitsema lämpöenergia. Vuonna 2011 maalämpö valittiin lähes 50 prosenttiin uusista pientaloista. Kyseinen vaihtoehto on varsinkin kannattava Suomessa, jossa ilman lämpötila voi tippua melko pienille lukemille talven aikana. Maan lämpötila sen sijaan pysyy melko vakiona koko vuoden ympäri. Tämän lisäksi pumppu on helppokäyttöinen, sillä se vaatii vain vähän huolto- ja tarkistus toimenpiteitä. (Motiva 2019)

Maalämpöpumpun ohjaamisen taloudellista kannattavuutta on tutkittu Schibuolan, Scarpan ja Tambanin tutkimuksessa (2015) maalämpöpumpun ohjauksen kannattavuudesta sähkön hinnan ja paikallisen aurinkosähköjärjestelmän energiantuotannon perusteella. Tutkimuksessa löydettiin, että ohjauksella voidaan säästää jopa 30 % käyttökustannuksista. Aikaohjauksen kannattavuutta on tutkittu myös Tahersiman, Tikalskyn ja Revankarin tutkimuksessa (2018). Tutkimuksessa tavoitteena oli selvittää voiko kohdetta lämmittää vain yöllä, ilman että mukavuus kärsii. Tutkimus tehtiin kahdessa viikon pätkässä ja lämmitys suoritettiin 20.00 – 08.00 välillä. Tuloksena oli että riittävän suurella massavaraajalla tämä on mahdollista, ja näin voi käyttökustannuksista säästää jopa 40 %.

Tämän tutkimuksen tavoitteena on selvittää maalämpöpumpun aikaohjauksen kannattavuutta Elspot markkinoiden sähkön hinnan perusteella. Aikaohjauksen kannattavuutta tutkitaan vertaamalla pumpun käyttöä rakennuksen lämmityksessä yö- ja päiväsaikoina, siten että kummallakin ohjaustavalla pumpulla tuotetaan sama energiamäärä. Aikaohjauksella pumpua ei käytetä päiväsaikoina ollenkaan ja ilman aikaohjausta lämmitys suoritetaan kolmessa erässä: kerran yösaikoina ja kaksi kertaa päiväsaikoina. Tavoitteena on selvittää kuinka paljon yösaikoina tulisi olla päiväsaikoina verrattuna, jotta pelkästään yöllä käyttäminen olisi kannattavaa. Lisäksi selvitetään käyttöveden lämmittämisen kannattavuutta, laskemalla kuinka paljon kuumemmaksi käyttövesi voidaan lämmittää aikaohjauksella, kuin jos lämmitettäisiin päivällä, samoilla lämmityskustannuksilla.

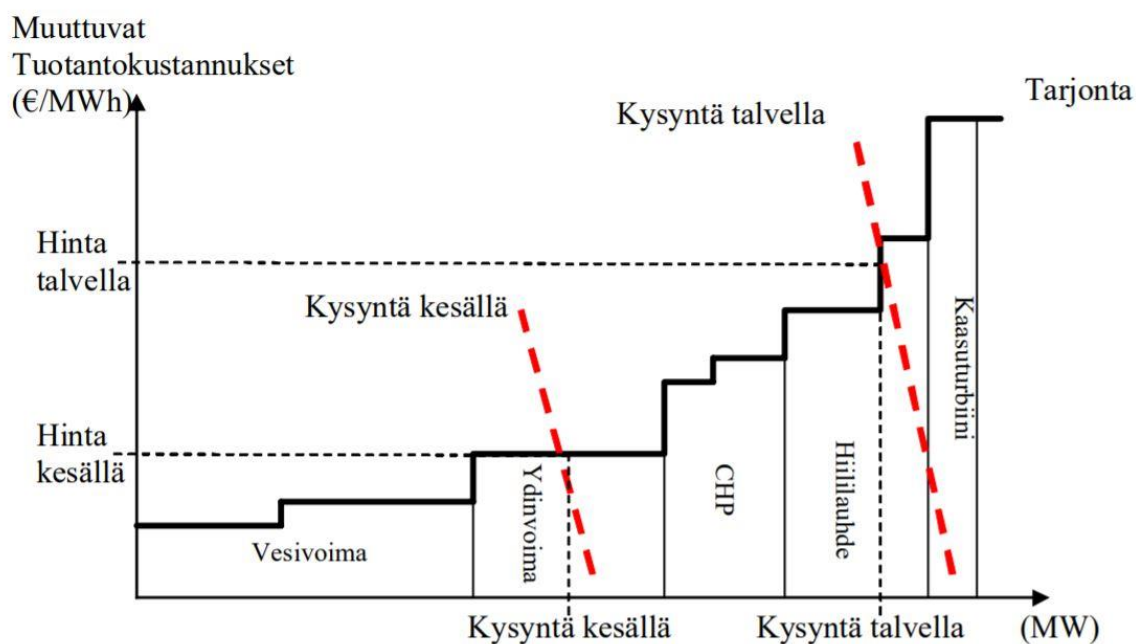
Työn alussa esitellään Nord poolissa Elspot sähkön hinnan muodostuminen ja maalämpöpumpun toiminta yleisesti, ja selvitetään spot markkinoiden yö- ja päivähintojen suhde, vuonna 2019. Kannattavuuden selvittämistä varten tarvitaan käytetyn maalämpöpumpun tehokerroin käyrä, mikä muodostetaan omakotitalon maalämpöpumpusta kerätyn mittausdatan avulla. Tämän jälkeen lasketaan mikä yö- ja päivähintojen hintojen suhde pitää olla, että edellä mainituilla tavoilla on rakennuksen lämmittäminen taloudellisesti yhtä kannattavaa. Tätä tulosta verrataan Juha Vahvasen kandidaatintyössä (2019) esitellyn esimerkkikohteen energiatarpeeseen, jotta saadaan selville, onko toiminta käytännössä kannattavaa. Lopuksi lasketaan käyttöveden lämmittämisen kannattavuus yöllä edellä mainitulla tavalla ja selvitetään kuinka paljon kuumemmaksi sen saisi lämmitettyä spot markkinoiden vuoden keskiarvon mukaan.

2. FYYSISEN SÄHKÖN HINNAN MÄÄRÄYTYMINEN SUOMESSA

Pohjoismaissa ja Baltian maissa sähköenergian toimitukseen johtavien tuotteiden kauppa käydään pohjoismaisen sähköpörssin Nord Poolin kautta. Sähköenergian markkinat jakautuvat Elspot- ja Elbas-markkinoihin. Elspot-markkinoilla käydään kauppaa seuraavan päivän sähkötoimituksilla. Kauppa käydään suljettuna huutokauppana, niin että kukaan toimitus- tai ostotarjouksen tehneistä ei tiedä kuinka suurina muiden toimittajien tarjoukset ovat. Kaupankäynti tehdään kerran päivässä ja tarjoukset tulee jättää kello 12.00 mennessä, Keski-Euroopan aikaa. Tarjouksia voi tehdä enintään 12 päiväksi eteenpäin. Annettujen tarjousten perusteella, noin tunnin kuluttua kaupankäynnin sulkemisesta seuraavalle vuorokaudelle, määritetään seuraavan vuorokauden jokaiselle tunnille markkinahinnat. Tarjouksen tekijät, jos heidän tarjouksensa hyväksytään, ovat velvoitettuja toimittamaan tai kuluttamaan tarjouksensa mukaisen määrän energiaa. (Partanen et al. 2019; Nord pool, Day-ahead market 2020)

2.1 Sähkön hinnan muodostuminen Elspot-markkinoilla

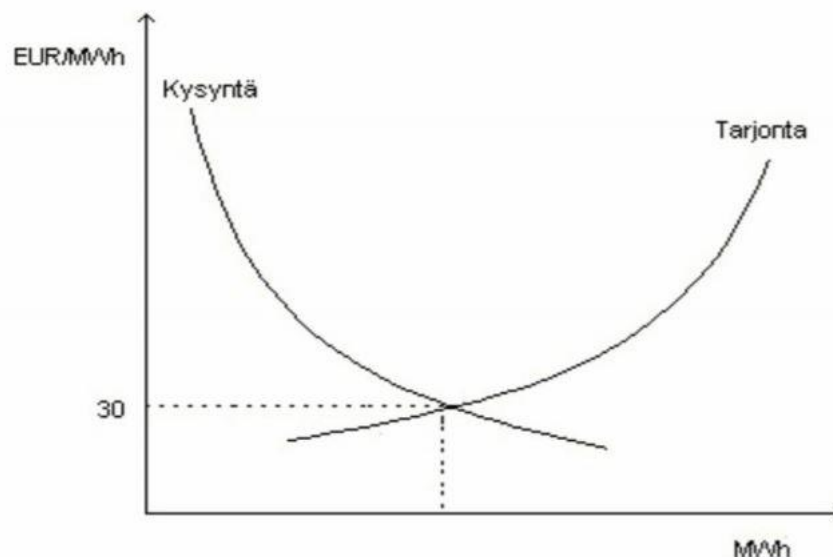
Sähkön markkinahinta muodostuu kysynnän ja tarjonnan mukaan jokaiselle vuorokauden tunnille erikseen. Vuorokaudelle tehtyjen myynti- ja ostotarjousten perusteella muodostetaan sähkölle markkinahinta kalleimman käyttöön otetun sähkön tuotantomuodon mukaan. Hinnan muodostumista on havainnollistettu kuvassa 2.1. (Partanen et al. 2019)



Kuva 2.1: Markkinahinnan muodostuminen käytetyn tuotantomuodon mukaan. (Partanen et al., 2019)

Sähkön markkinahinta kertoo, kuinka paljon kuluttaja on valmis maksamaan tarvitsemastaan sähköenergiasta, jolla voidaan kattaa kuluttajan energiantarve. Kuvasta 2.1 nähdään että kulutuksen ollessa vähäistä, voidaan tuotantoon käyttää halvempia tuotantomuotoja. Kulutuksen ollessa korkealla, taas joudutaan ottamaan käyttöön kalliimpia tuotantomuotoja. Näin ollen markkinahinta muodostuu kalleimman käyttöön otetun tuotantomuodon mukaan. (Partanen et al. 2019)

Systeemihinnan määrittämiseksi, vuorokauden jokaiselle käyttötunnille tehdään toimijoiden tekemien myynti- ja ostotarjousten perusteella kysyntä- ja tarjontakäyrät. Kyseisen käyttötunnin systeemihinnaksi muodostuu käyrien leikkauspiste. Systeemihinta on sama kaikille toimijoille. Hinnan muodostumista on havainnollistettu kuvassa 2.2. (Partanen et al. 2019)



Kuva 2.2: Systeemihinnan muodostuminen kysyntä- ja tarjontakäyrien leikkauspisteessä. (Partanen et al. 2019)

2.2 Suomen aluehinta Elspot markkinoilla

Nord Pool on jaettu 21:een hinnoittelualueeseen, joista jokaiselle määräytyy oma aluehinta (Nord Pool 2020). Kun eri markkina-alueiden välillä on siirtokapasiteettia jäljellä, on alueen aluehinta sama kuin systeemihinta. Jos siirtokapasiteetti menee täyteen, poikkeaa kyseisen alueen aluehinta systeemihinnasta, kyseisellä tunnilla. Suomen Elspot aluehinta määräytyy omana alueenaan. (Partanen et al. 2019)

2.3 Aikasähkö hinnan vaihtelu Elspot markkinoilla

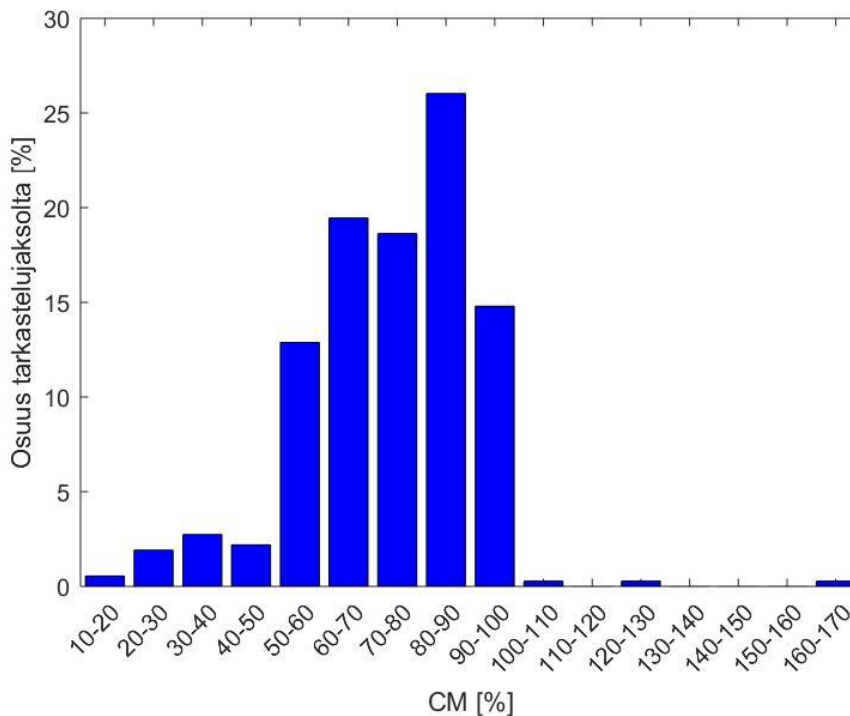
Aikasähköllä tarkoitetaan sähkön hinnoittelun jakamista päivä- ja yöajoille. Jaottelu tapahtuu usein siten että yöllä halvempaa sähköä saa kello 22.00 ja 07.00 välillä ja päivällä 07.00 – 22.00 on sähkö kalliimpaa.

Elspot sähkön hinnan aikavaihtelu on laskettu seuraavan yhtälön mukaan:

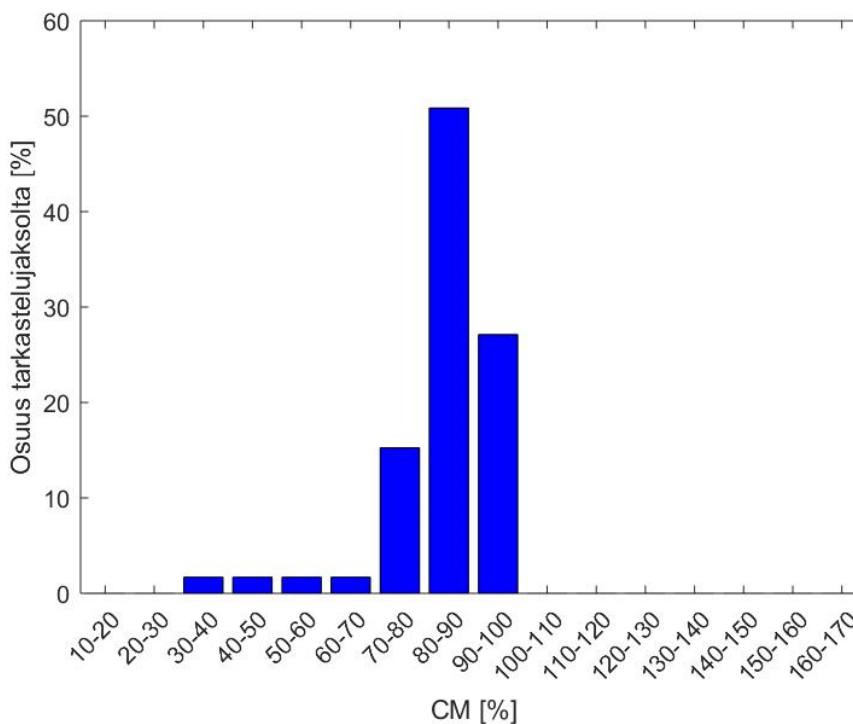
$$CM = \frac{\text{yö hinta}}{\text{päivä hinta}}, \quad (2.1)$$

jossa CM on yöhinnan suhde päivähintaan, päivä hinta on vuorokauden tuntien 07.00 ja 22.00 hintojen keskiarvo ja yö hinta on saman vuorokauden tuntien 00.00 – 07.00 ja edellisen vuorokauden tuntien 22.00 - 24.00 hintojen keskiarvo.

Kuvassa 2.3 on esitetty spot markkinoilla Suomessa sähkön yö- ja päivähintojen suhde CM vuoden 2019 aikana ja kuvassa 2.4 on esitetty CM vuoden 2019 tammi- ja helmikuun aikana (Nord pool, historical market data 2020).



Kuva 2.3: Yösähkön hinta verrattuna päiväsähkseen Elspot markkinoilla, vuoden 2019 aikana.



Kuva 2.4: Yösähkön hinta verrattuna päiväsähkseen Elspot markkinoilla, tammi- ja helmikuu 2019.

Vaikka Elspot markkinoilla ei ole varsinaista aikasähkö hintajaottelua, on kuvassa 2.3 selvästi nähtävissä yöllä olevan yleensä huomattavasti halvempi sähkön hinta. Kuvassa 2.4 tammi- ja helmikuussa, vuoden kylmimpään aikaan, on samoin, vaikka suurimmat vaihtelut hintasuhteissa tulevat muina vuoden aikoina. *CM* keskiarvot koko vuoden ajalta on 73,51 % ja pelkästään tammi- ja helmikuun osalta keskiarvo on 83,80 %. Keskiarvot on koottu taulukkoon 2.1. Tässä ei ole otettu huomioon sähkön siirtomaksuja tai veroja, mitkä muuttaisivat keskiarvoa.

Taulukko 2.1: Elspot markkinoiden *CM* keskiarvot.

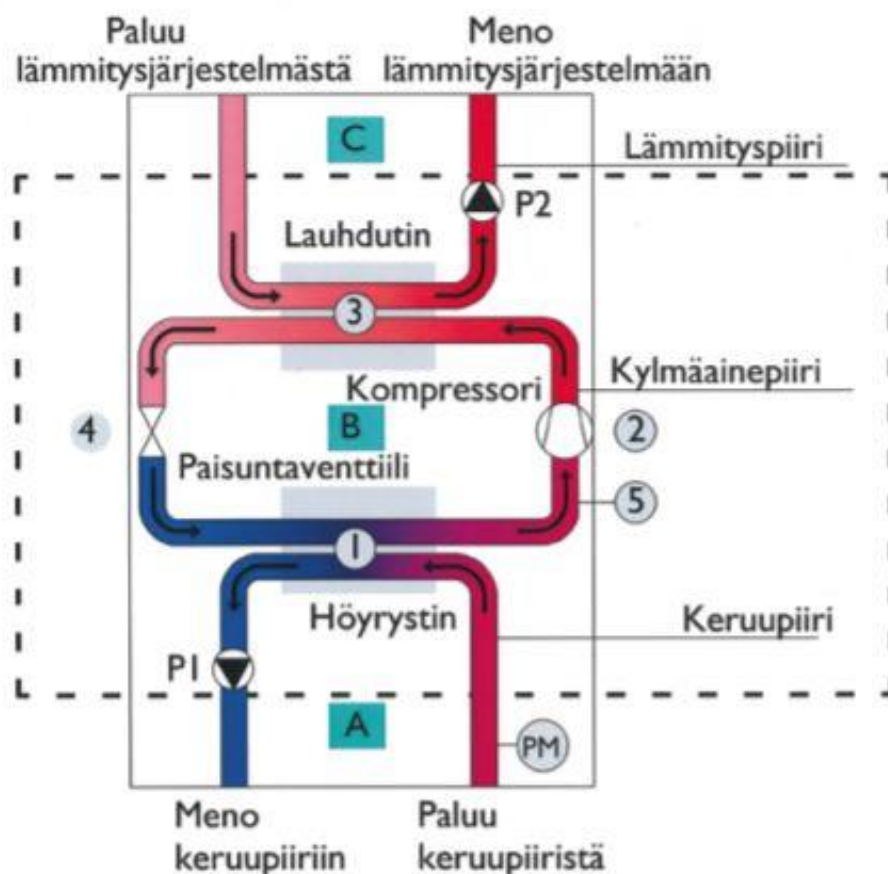
Tarkastelujakso	CM keskiarvo [%]
Koko vuosi	73,51
Tammi- ja helmikuu	83,80

Aikaohjaus on myös hyödyllistä sähköverkon näkökulmasta, sillä verkon käyttövarmuuden ylläpitäminen kulutushuippujen aikana on paljon hankalampaa kuin pienen kulutuksen aikaan. Muuttamalla kulutus yölle vapautetaan järjestelmäoperaattorien resursseja kulutushuippunaikana, jolloin voivat paremmin huolehtia verkon käyttövarmuuden säilymisestä. Tämän toteutuminen tulee yhä tärkeämmäksi, kun yhä suurempi osa tuotetusta sähköstä tehdään aurinkoenergialla tai vastaavilla tuotantomuodoilla, joiden tuotantoa ei voi kontrolloida. (Koponen et al. 2006)

3. MAALÄMPÖJÄRJESTELMÄN TOIMINTA

Maalämpöjärjestelmät sisältävät kolme osaa: keruupiiri, kylmäainepiiri ja talon lämmityspiiri. Keruupiirillä kerätään maasta lämpöä ja siirretään se kylmäainepiiriin. Kylmäainepiiri siirtää lämmön lämmityspiiriin, ja siten talon lämmitysjärjestelmän hyödynnettäväksi. (Juvonen & Lapinlampi 2013)

Keruupiiri koostuu kahdesta osasta: keruuputkistosta ja siirtoputkistosta. Keruuputkistolla kerätään lämmönkeruunesteellä lämpöä maaperästä, joko maapiirin tai energiakaivon avulla. Maapiiri kerää lämpöä maan pintaosista noin metrin syvyydellä ja on pituudeltaan vähintään lähes 500 metriä. Energiakaivo kerää lämpöä syvältä maan sisältä, yleensä alle 300 metrin syvyydeltä. Kaivoja voi joutua poraamaan useita, yhden rakennuksen lämmittämiseen (Juvonen & Lapinlampi 2013). Maalämpöpumpulla voidaan kerätä lämpöä myös vesistöistä, jolloin keruupiiri upotetaan vesistön pohjaan tai pohjamutaan painoilla (Motiva 2017a). Kuvassa 3.1 on esitetty maalämpöpumpun toimintaperiaate.



Kuva 3.1: Maalämpöpumpun toimintaperiaate ja osat. P1 ja P2 ovat kiertovesivesipumppuja. (Juvonen & Lapinlampi 2013)

Keruupiiri (A) siirtää lämmön maaperästä höyrystimeen (1), josta lämpö menee pumpun kylmäainepiiriin (B). Kylmäainepiirissä höyrystynyt kylmäaine paineistetaan kompressorilla (2) ja viedään lauhduttimeen (3), missä se luovuttaa lämpönsä talon lämmityspiiriin (C). Lauhduttimen jälkeen nestemäinen kylmäaine menee paisuntaventtiilin jälkeen takaisin höy-

rystimeen ja kierto alkaa uudestaan. Lämmityspiirissä lämpö kulkeutuu talon lämmitysjärjestelmän hyödynnettäväksi. Pumpun tuottama lämpö voidaan varastoida maalämpöpumpun sisäiseen tai erilliseen varaajaan. (Juvonen & Lapinlampi 2013)

Maalämpöpumppu voidaan mitoittaa joko osa- tai täysitehoisena riippuen siitä halutaanko pumpulla tuottaa rakennuksen koko lämpöenergian tarve, myös lämmöntehohuipun aikana, vai aiotaanko pumpun lisäksi käyttää esimerkiksi sähkövastuksia. Osatehoinen mitoitus tehdään yleensä kattamaan noin 60 – 80 % huippulämmitystarpeesta, jolloin sillä voidaan kattaa noin 95 – 99 % vuotuisesta energiantarpeesta. (Motiva 2017b)

3.1 Maalämpöpumpun tehokkuus

Maalämpöpumpun tehokkuutta kuvataan tehokertoimella eli COP (coefficient of performance) luvulla. COP-luku kertoo, kuinka monin kertainen lämpöenergian määrä saadaan pumpusta ulos verrattuna pumpun käyttämään sähköenergiaan. Maalämpöpumpun teoreettisesti suurin mahdollinen COP saadaan laskettua yhtälöllä:

$$COP = \frac{T_H}{T_H - T_C}, \quad (3.1)$$

missä T_H on lämpötila lämmityspiirissä ja T_C on lämpötila lämpölähteessä. (Tame 2019)

Pumpun todellinen COP saadaan laskettua yhtälöllä:

$$COP = \frac{Q}{W}, \quad (3.2)$$

jossa Q on pumpun tuottama lämpöenergia ja W on pumpun tekemä työ. (Reay & MacMichael 1979)

Kaavasta (3.1) nähdään, että maalämpöpumpun COP ei ole vakio, vaan se muuttuu lämmityspiirin ja lämpönielun lämpötilaeron johdosta merkittävästi. Mitä pienempi lämpötilaero on, sitä parempi pumpun hyötysuhde on. Maaperän lämpötila pysyy ympärivuotisesti melko lähellä samaa, joten lämpötilaeron pienentäminen tapahtuu lähinnä vähentämällä lämmityspiirin lämpötilaa. Pumpun todellinen COP ei voi ylittää sen suurinta mahdollista COP-arvoa (Tame 2019). Maalämpöpumppujen vuoden keskimääräinen COP vaihtelee useimmiten välillä 2,5 – 3,5, riippuen lämmönjakotavasta ja pumpun ominaisuuksista. (Motiva 2017b)

3.2 COP-käyrän laskeminen mittausdatan perusteella

Tässä työssä tehdään Nibe F1255-12 R EM pumpulle COP-käyrä kerätyn mittausdatan perusteella. Pumppu on invertteriohjattu ja sen antoteho on 3 – 12 kW. Maalämpöpumpusta on mitattu seuraavat arvot:

- mittaus aika
- käytetty sähköenergia E_{el}
- vedenlämmitykseen käytetty energia E_{hw}
- lattialämmitykseen käytetty energia E_{he}
- talon lämmityskierto on lähtevän nesteiden lämpötila T_{out}
- tilavuusvirta talon lämmityskierrossa q

- lämmönkeruunesteen lämpöpumppuun paluun lämpötila $T_{\text{brine,in}}$
- lämmönkeruunesteen pumpusta keruukiertoon lähdön lämpötila $T_{\text{brine,out}}$
- lämmityskierrosta palaavan nesteen lämpötila T_{ret}

yhden minuutin väliajoilla. Mittausdata on mitattu tammi-toukokuussa 2019. Datasta on laskettu COP-pisteitä liukuvan keskiarvon menetelmällä. Laskennassa jätettiin huomiotta pisteet, joissa COP on suurempi kuin 7 tai pienempi kuin 1 tai lämpötilaero on pienempi kuin 15 astetta, jotta saadaan todenmukaisempi käyrä.

COP laskussa tarvitaan lämmitysteho P_{he} ja sähköteho P_{el} , jotka lasketaan yhtälöillä:

$$P_{\text{he}} = c \times (T_{\text{out}} - T_{\text{ret}}) \times \rho \times q, \quad (3.3)$$

jossa c on veden ominaislämpökapasiteetti $4,19 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$ ja ρ on veden tiheys $1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ (Sharma et al. 2009).

$$P_{\text{el}} = \frac{dE_{\text{el}}}{dt}, \quad (3.4)$$

COP lasketaan yhtälön (3.2) mukaan johdetulla yhtälöllä:

$$\text{COP} = \frac{Q}{W} = \frac{\frac{dQ}{dt}}{\frac{dW}{dt}} = \frac{P_{\text{he}}}{P_{\text{el}}}, \quad (3.5)$$

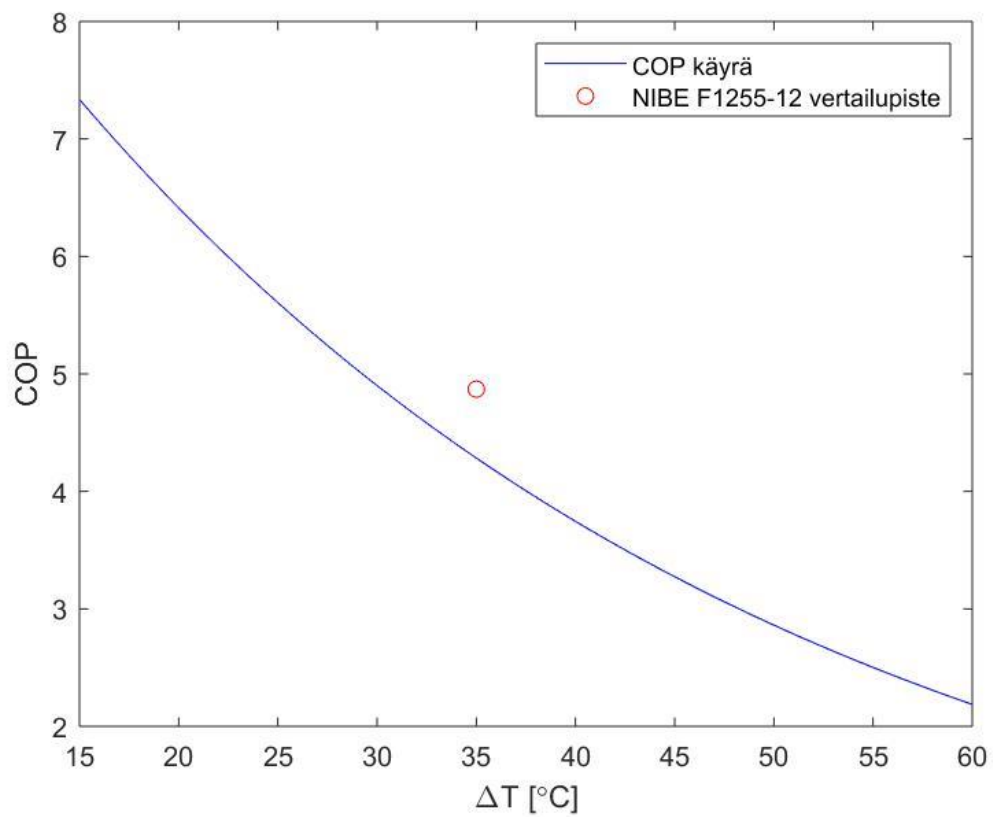
COP käyrän tekoon tarvitaan kunkin COP pisteen lämpötilaero ΔT , joka saadaan yhtälöllä:

$$\Delta T = T_{\text{out}} - T_{\text{brine,in}}, \quad (3.6)$$

Laskettuihin pisteisiin tehdään käyräsovitusta pienimmän neliösumman menetelmällä, josta saatiin seuraava sovite:

$$\text{COP} = 10,98 \times e^{-0,0269 \times \Delta T}, \quad (3.7)$$

Kuvassa 3.2 on esitetty COP käyrä, joka on laskettu pumpun mittausdatasta. Kuvassa y-akselilla on COP arvo ja x-akselilla lämpötilaero ΔT . Kerätyt COP pisteet on esitetty liitteessä 1.



Kuva 3.2: Mittausdatasta muodostettu COP käyrä.

Kuvan 3.2 käyräsovite vaikuttaa melko uskottavalta, kun sitä verrataan F1255-12 lämpöpumpun datalehdessä ilmoitettuun COP arvoon, joka on laskettu nimellisteholla EN 14511 standardin mukaisesti. (Taloon 2020)

4. KANNATTAVUUS

Maalämpöpumpun aikaohjauksen kannattavuutta arvioidaan laskemalla kuinka suuri hinta ero päivä- ja yö sähköhinnan välillä tulisi olla, että pelkästään yöllä lämmittämistä kannattaisi käyttää. Rakennuksen lämmittämisen kannattavuuden laskussa on oletettu pumpulla tuotettavan yhtä suuri määrä lämpöenergiaa aikaohjattuna lämmittämällä pelkästään yöllä, ja ilman aikaohjausta lämmittämällä kolmessa erässä: kerran yöllä sekä kaksi kertaa päivällä. Käyttöveden lämmittämässä on oletettu vettä lämmitettävän kerran joko yöllä tai päivällä.

Jotta saadaan selville, olisiko toiminnassa käytännössä hyötyä, verrataan rakennuksen lämmityksestä saatuja tuloksia Juha Vahvasen kandidaatintyössä esitettyyn omakotitaloon.

4.1 Esimerkki kohde

Vahvasen kandidaatin työssä on tutkittu vuonna 1900 valmistettua puurakenteista omakotitaloa, joka peruskorjattiin vuonna 1986. Rakennuksen yhteenlaskettu alapohjan pinta-ala on 170 m^2 , ja rakennuksessa on alapohjassa 100 mm syvä betonivalu. Laskennassa betonivalun alla oletetaan olevan 100 mm paksu styroksi eriste, sillä eristyksellä maasta on selvä vaikutus lattiavaraajan kannattavuuteen (Chuangchid & Krarti 2001). Betonin yläpuolella olevaa lattian pintamateriaalia tai muita betonin päällä olevia materiaaleja ei huomioida laskuissa. Päivittäinen käyttöveden tarve on ilmoitettu olevan 200 litraa. (Vahvanen 2019)

Vahvasen työssä esitetyn talon keskimääräinen lämmitysenergian tarve, pois lukien maahan johtuvat häviöt, päiväntuntien aikana on 16.73 kWh ja huippulämmitysenergian tarve on 83.87 kWh. Maahan johtuvia häviöitä ei ole huomioitu tässä sillä ne huomioidaan hyötykäyttöön menevän lämpöenergian laskennassa, luvussa 4.3. Tarkempi selvitys laskentaprosessista on esitetty liitteessä 2 ja lämpöenergian tarpeet on koottu taulukossa 4.1.

Taulukko 4.1. Lämmitysenergian tarve.

Keskimääräinen lämmitysenergian tarve	16.73 kWh
Huippulämmitysenergian tarve	83.87 kWh

4.2 Käytetyn sähköenergian laskenta

Lämmityksessä käytetyn sähköenergian määrä lasketaan yhtälöillä (4.1) – (4.7). Lämpövaraajan lämpökapasiteetti C lasketaan yhtälöllä:

$$C = cV\rho, \quad (4.1)$$

jossa c on käytetyn lämmönvarausmateriaalin ominaislämpökapasiteetti, V on lämpövaraajan tilavuus ja ρ on käytetyn lämmönvarausmateriaalin tiheys.

Lämpövaraajassa tapahtuva lämpötilan muutos T_{muutos} lasketaan yhtälöllä:

$$T_{\text{muutos}} = \frac{Q}{C}, \quad (4.2)$$

jossa Q on lämpöpumpulla varaajaan tuotettu lämpöenergia.

Lämpövaraajan loppulämpötila T_{loppu} lasketaan yhtälöllä:

$$T_{\text{loppu}} = T_0 + T_{\text{muutos}}, \quad (4.3)$$

jossa T_0 on lämpövaraajan alkulämpötila.

Koska COP lasketaan lämpötilaeron mukaan, alku- ja loppulämpötilasta vähennetään lämmön lähteen lämpötila:

$$T_{0,\text{ero}} = T_0 - T_{\text{brine,in}}, \quad (4.4)$$

$$T_{\text{loppu,ero}} = T_{\text{loppu}} - T_{\text{brine,in}}, \quad (4.5)$$

jossa $T_{\text{brine,in}}$ on pumpun mittausdatasta laskettu lämmönkeruunesteen paluun keskilämpötila, 3.93 °C.

Lämmitysjakson keskimääräistä COP-arvoa voidaan approksimoida aritmeettisella keskiarvolla, joka lasketaan yhtälöllä (4.6). Maalämpöpumpun menoveden lämpötila on oletettu 5 °C suuremmaksi kuin varaajan lämpötila, sillä lämpötilaero lämmönlähteen ja lämmityskohteen välillä tarvitaan, jotta lämpöä siirtyy.

$$COP_{\text{kesk}} = \frac{\int_{T_{0,\text{ero}} + 5}^{T_{\text{loppu,ero}} + 5} COP(\Delta T) dT}{T_{\text{muutos}}}, \quad (4.6)$$

jossa COP_{kesk} on lämmityksen aikana lämpöpumpun keskimääräinen tehokerroin.

Keskimääräisen tehokertoimen avulla saadaan lämmitykseen käytetty sähköenergia sijoittamalla yhtälöön (3.2) yhtälö (4.6):

$$E = \frac{Q}{COP_{\text{kesk}}}, \quad (4.7)$$

4.3 Rakennuksen lämmityksen kannattavuus

Rakennusta lämmittäessä on oletettu lämmityksen tapahtuvan joko kerran yöllä kokonaisuudessaan tai kolmessa erässä: kerran yöllä ja kaksi kertaa päivällä. Vuorokauden ajalle valittiin kolme lämmityskertaa, koska mittausdatan perusteella pumppu on tehnyt rakennuksen lämmityksen yleensä 2 – 3 kertaa vuorokaudessa, riippuen mittausajankohdasta. Tammi-kuussa yleensä kaksi pidempää lämmityssykliä, helmikuusta eteenpäin kolme lyhyempää sykliä vuorokauden aikana. Tämä tarkoittaa että pumppu ei kyennyt tekemään tarpeeksi pientä tehoa pitääkseen itseään päällä jatkuvasti. Yhtälöissä (4.8) – (4.11) on esitetty miten tarvittava hintasuhde yö ja päivä sähkön hinnoissa on laskettu, jotta kummatkin menetelmät ovat yhtä kannattavia.

Päiväsähkön hinta $p_{\text{päivä}}$ voidaan esittää seuraavalla tavalla:

$$p_{\text{päivä}} = p_{\text{yö}} + \Delta p, \quad (4.8)$$

jossa $p_{\text{yö}}$ on sähkön hinta yöllä ja Δp on hintojen ero.

Lämmitysmenetelmien kannattavuus voidaan laskea yhtälöllä:

$$p_{\text{yö}} E_{\text{ao}} = p_{\text{yö}} E_{\text{ilman}} + 2p_{\text{päivä}} E_{\text{ilman}}, \quad (4.9)$$

jossa E_{ao} on kulutettu sähköenergia lämmittämällä aikaohjauksella eli pelkästään yöllä lämmittämällä ja E_{ilman} kulutettu energia ilman aikaohjausta eli kulutettu energia yhdellä vuorokauden aikana tapahtuvasta kolmesta lämmityskerrasta.

Sijoittamalla yhtälö (4.8) yhtälöön (4.9), voidaan päästä seuraavaan muotoon:

$$\Delta p = p_{\text{yö}} \frac{E_{\text{ao}} - 3E_{\text{ilman}}}{2E_{\text{ilman}}}, \quad (4.10)$$

Seuraavalla yhtälöllä voidaan laskea tarvittava sähkön yö- ja päivähintojen suhde, jolla kummatkin ohjaustavat ovat yhtä kannattavia:

$$CM = \frac{p_{\text{yö}}}{p_{\text{päivä}}} = \frac{p_{\text{yö}}}{p_{\text{yö}} + \Delta p} = \frac{1}{1 + \Delta p}, \quad (4.11)$$

Kun $p_{\text{yö}}$ on yksi, kertoo CM kuinka paljon yösähkön hinta voi olla korkeintaan suhteessa päivänsähkön hintaan, jotta pelkästään yöllä lämmittäminen kannattaisi.

Lämpöenergian häviö maahan on laskettu selvittämällä betonivaraajasta lämpöteho maahan, olettamalla häviön pysyvän samana 10 minuutin ajan ja laskemalla siirtynyt lämpöenergia, laskemalla betonivaraajan uusi lämpötila ja laskemalla uusi lämpöteho. Varaajan lämpötilan on oletettu olevan kaikkialla sama, eli lämmönsiirtymistä varaajan sisällä ei ole huomioitu. Lämpöhäviö on laskettu päivätuntien ajalta. Lämpöhäviöteho on laskettu seuraavalla yhtälöllä:

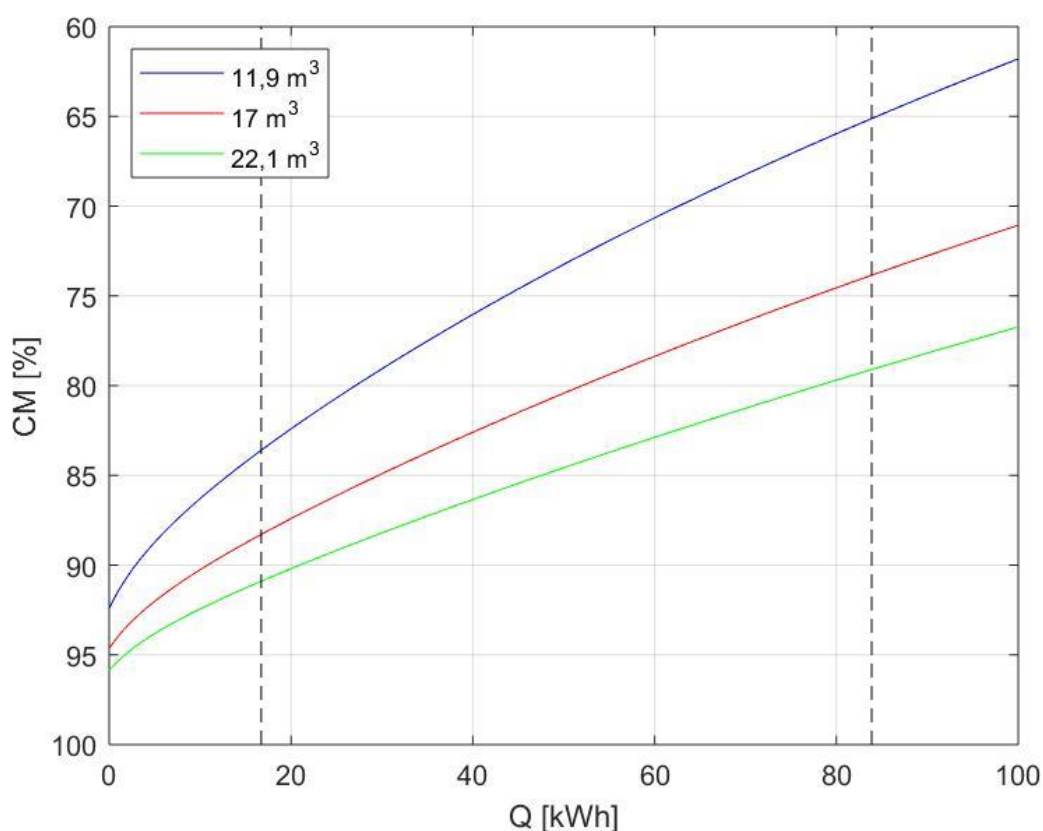
$$q_{\text{häviö}} = \frac{kA(T_{\text{varaaja}} - T_{\text{maa}})}{L}, \quad (4.12)$$

jossa k on lämmönjohtavuus eristeessä varaajan ja maan välissä $0.026 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$, A on varaajan pinta-ala, T_{varaaja} on varaajan lämpötila, T_{maa} on maan lämpötila $8 \text{ }^\circ\text{C}$ ja L on eristeen leveys 100 mm . Rantalan (2006) tutkimuksen mukaan maan lämpötila on Etelä-Suomessa betoni-lattiavaraajaa käyttävän talon alla kylmimmillään $8 \text{ }^\circ\text{C}$.

Kannattavuuteen vaikuttaa olennaisesti käytetty lämpövaraaja, sillä yhtälön (3.1) mukaisesti lämpöpumpun tehokerroin riippuu lämpötilaerosta eli lämpövaraajan lämpötilasta, minkä määrittelee yhtälön (4.5) mukaan varaajan lämpökapasiteetti. Laskennassa on käytetty kolmea eri lämpövaraajan tilavuutta, jotta nähdään miten varaajan koko vaikuttaa lämmittämisen kannattavuuteen.

Talonlämmityksen laskennassa on käytetty betonivaraajia, joiden tilavuudet ovat 11.9 m^3 , 17 m^3 ja 22.1 m^3 , eli tilavuuksia on keskimmäisestä muutettu 30 % suuremmaksi ja pienemmäksi. Eri tilavuudet ovat kooltaan 30 % keskimmäistä tilavuutta suurempi ja pienempi. Betonin ominaislämpökapasiteetti on $0.88 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$ ja tiheys on $2300 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ (Sharma et al. 2009). Varaajan alkulämpötilaksi on asetettu $25 \text{ }^\circ\text{C}$.

Kuvassa 4.1 on esitetty yö- ja päivähintojen suhde, CM , jolla eri lämmitysmenetelmät ovat yhtä kannattavia. Kuvan x-akselilla on hyötykäyttöön mennyt lämpöenergia, eli tuotetusta kokonaislämpöenergiasta on vähennetty lämpöhäviöiden kautta menetetty energia. Kuvassa on mustalla katkoviivalla merkitty taulukossa 4.1 esitetty esimerkki rakennuksen päivätuntien keskimääräinen lämmitysenergian tarve ja huippulämmitysenergian tarve.



Kuva 4.1: CM , jolla eri ohjaustavat ovat betonivaraajilla yhtä kannattavia. X-akselilla on hyötykäyttöön mennyt lämpöenergia. Mustalla katkoviivalla on merkitty esimerkki rakennuksen keskimääräinen lämmitysenergian tarve ja huippulämmitysenergian tarve.

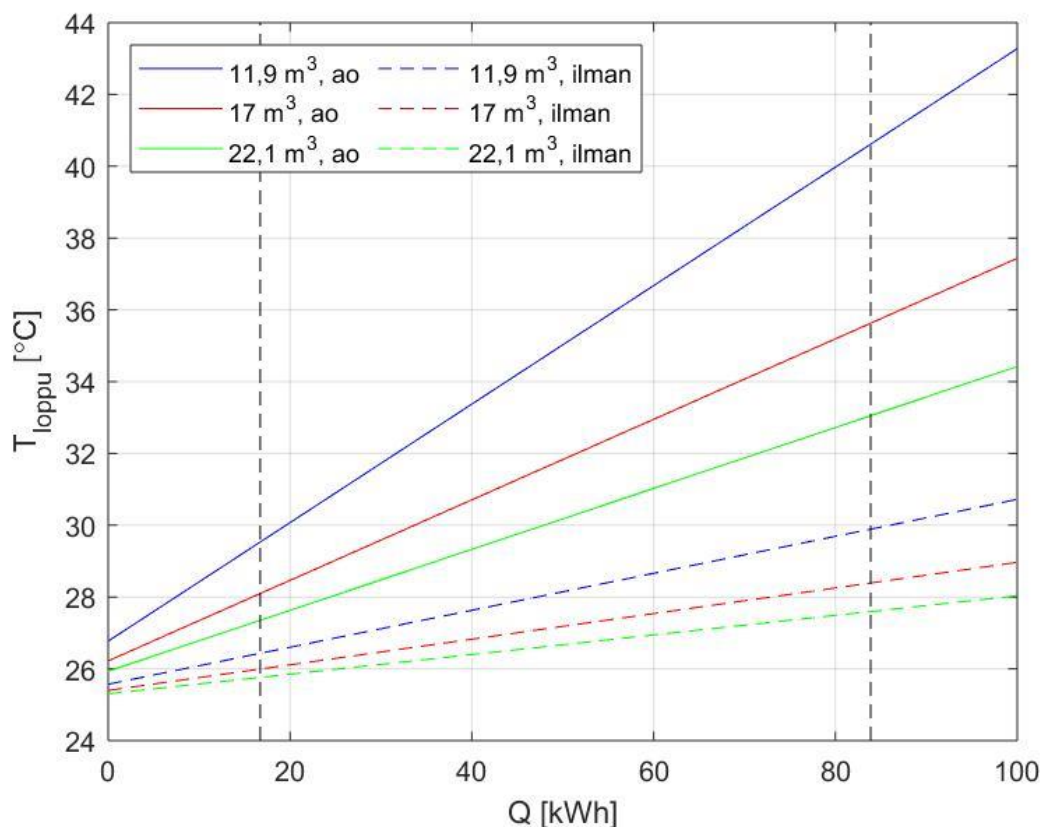
Kuvasta nähdään, että varaajan koon kasvattaminen tekee toiminnasta kannattavampaa. Koon kasvattaminen kumminkin menettää hyötyään mitä suuremmaksi varaaja kasvaa. CM muuttuminen myös hidastuu tuotetun lämpömäärän kasvaessa, johtuen kuvassa 3.2 esitetyn COP käyrän muodosta. Tämä ei kuitenkaan ole erityisen hyödyllistä sillä haluamme tuottaa vain tarvittavan määrän lämpöenergiaa.

Kohde rakennuksen tapauksessa nähdään, että pienimmällä varaajalla on tarvittava CM keskimääräisen lämmitysenergian kohdalla 83.6 %. Verrattuna taulukossa 1.1 esitettyyn spot

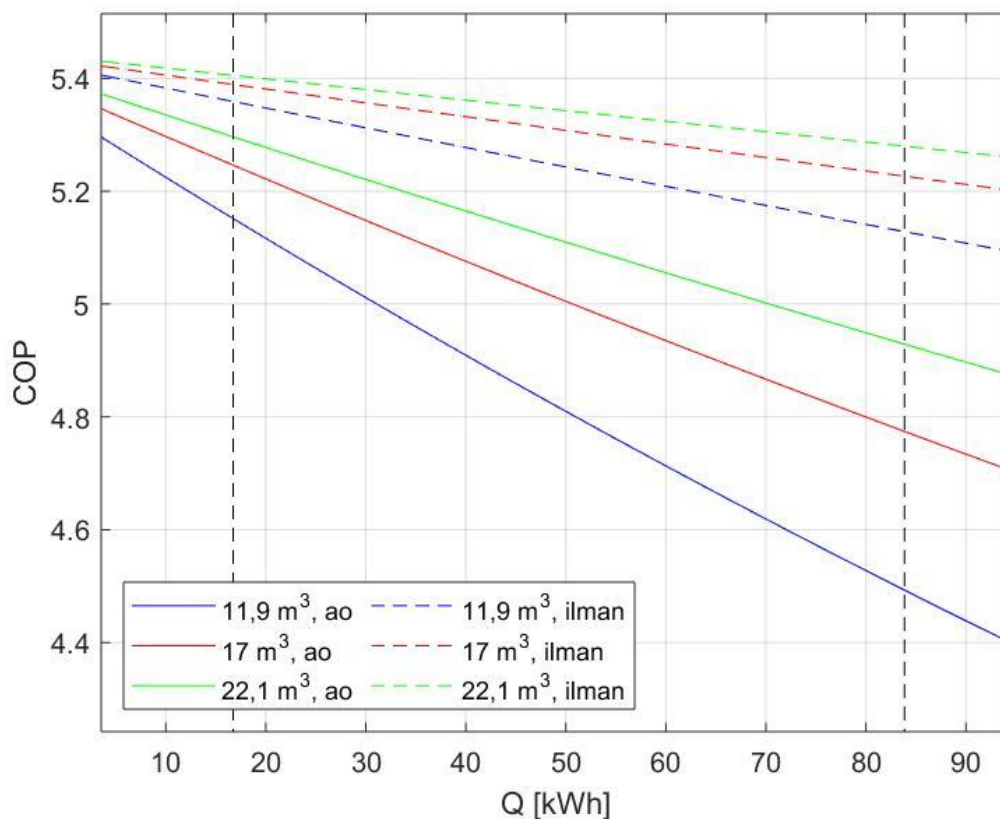
hintojen koko vuoden CM keskiarvoon, 73.51 %, on aikaohjauksen käyttäminen selvästi kannattavaa. Katsottaessa kuvaa 2.3 nähdään, että suurimman osaa vuodesta CM on 95 % alapuolella, joten tämäkin osoittaa toiminnan kannattavuutta.

Pienimmän varaajan huippulämmitys tarpeen vaatima CM on 65.1 %. Suurin lämmitystarve tapahtuu todennäköisesti tammi- ja helmikuussa, joten tätä lukua verrataan taulukossa 2.1 esitettyyn spot hintojen tammi- ja helmikuun CM keskiarvoon, 83.80 %. Aikaohjaus ei ole enää kannattavaa pienimmällä varaajalla, tai kahdella suuremmallakaan. Kannattavuus voi tässä tapauksessa myös vaihdella vuosittain, riippuen minkälainen hintajakauma tulee kyseisenä vuonna. Kuitenkin kylmimpinä talvipäivinä kannattaisi todennäköisesti lämmitellä useammassa erässä. Huomioon otettavaa on myös että kyseinen pumppu on teholtaan 3 – 12 kW mikä tarkoittaa että se voi yö tuntien aikana tuottaa 27 – 108 kWh lämpöenergiaa, jos pumppu pyörii koko yön. Ottaen huomioon lämpöhäviöihin mennyt energia, pienimmällä varaajalla tarvitsee huippulämmitystarpeen aikaan 104.47 kWh. Eli pumpulla pystytään tämä juuri tuottamaan mutta jos lämmitystarve on pieni, lämpöhäviöt mukaan lukien, niin pumppu ei pyöri koko yötä.

Kuvassa 4.2 on esitetty eri menetelmillä lämmitettäessä varaajien loppulämpötila aikaohjauksella ja ilman, ja kuvassa 4.3 on esitetty COP eri ohjausmenetelmillä, aikaohjauksella ja ilman. Varaajan lämpötila ja tehokerroin aikaohjauksella on merkitty indeksillä ao ja ilman aikaohjausta on merkitty $ilman$.



Kuva 4.2: Betoni varaajan loppulämpötila. X-akselilla on hyötykäyttöön saatu lämpöenergia. Mustalla katkoviivalla on merkitty esimerkki rakennuksen keskimääräinen lämmitysenergian tarve ja huippulämmitysenergian tarve.



Kuva 4.3: Betonivaraajalla lämmitysjakson keskimääräinen COP. X-akselilla on hyötykäyttöön saatu lämpöenergia. Mustalla katkoviivalla on merkitty esimerkki rakennuksen keskimääräinen lämmitysenergian tarve ja huippulämmitysenergian tarve.

Kuvasta 4.2 nähdään miten aikaohjaus vaikuttaa varaajan lämpötilaan ja kuvassa 4.3 nähdään vaikutus lämmitysjakson keskimääräiseen tehokertoimeen. Varaajan loppulämpötila pienenee, kun varaaja kasvaa, mutta mitä suuremmaksi varaaja kasvaa sitä pienempi muutos tapahtuu loppulämpötilassa, ja siten muutos tehokertoimessa. Varaajan kasvattaminen menettää hyötyään mitä suuremmaksi se kasvaa, ja samalla investointikustannukset kasvavat.

Loppulämpötila on myös otettava huomioon käyttömukavuutta ajatellen, koska lämpötilan nousu betonivaraajassa johtaa lämpötilan nousuun myös sisäilmassa. Esimerkiksi käytettäessä betonilattiaa varaajana ei lämpötilaa voisi nostaa 40 °C:een. Sen sijaan, isompaa varaajaa käytettäessä voisi varaajan lämpötila nousta vain reiluun 30 °C:een, huippulämmitys tarpeen aikaan, mikä kylmimpään vuodenaikaan alkaa olla sopiva Etelä-Suomessa (Motiva 2017c). Toisaalta lämpö voitaisiin myös varastoida esimerkiksi erilliseen vesivaraajaan, mutta silloin lämpöhäviöt kasvavat sekä käytetty sähköenergia, ylimääräisen vesikierron tarvitseman lämpötilasäädön johdosta, ja mukaan tulee ylimääräisen varaajan investointikustannukset. Sisäilman lämpötilan noususta seuraa myös suuremmat johtumishäviöt seinien ja katon kautta, sekä kasvaneet ilmavirtaukseen liittyvät häviöt. Laskennassa on oletettu sisäilman lämpötilan olevan vakio 22 °C.

Näihin tuloksiin tulee kumminkin suhtautua varauksella, sillä laskennassa on tehty joitakin yksinkertaistuksia. Varaajan lämpötila on oletettu olevan kaikkialta sama ja maan lämpötila on oletettu vakioksi, minkä johdosta lämpöhäviöt ovat tässä erikokoiset kuin todellisuudessa.

4.4 Käyttöveden lämmittämisen kannattavuus

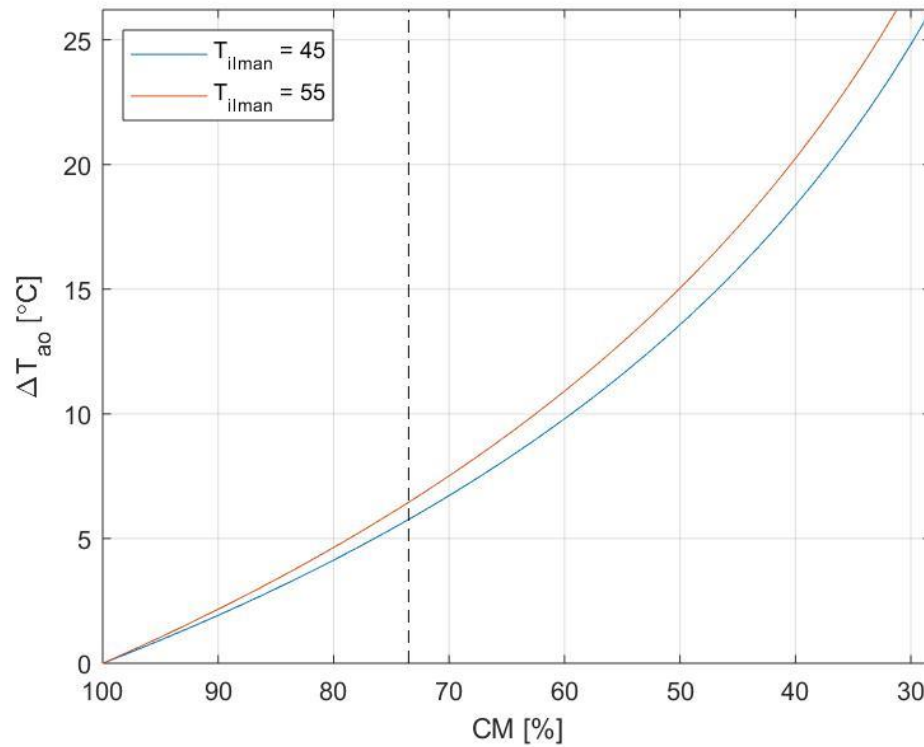
Aikaohjauksen kannattavuutta käyttöveden lämmityksessä selvitettiin lämmittämällä päivän aikana kuluva vesimäärä yhdellä kertaa joko yöllä tai päivällä. Laskennassa kylmän veden lämpötila on 10 °C ja kuuman veden lämpötilaksi on asetettu aluksi 45 °C ja sitten 55 °C. Tuloksista nähdään, kuinka paljon kuumemmaksi voidaan yösähköllä lämmittää vesi, samalla hinnalla. Käyttöveden lämmityksessä tarkastellaan lämpötilaa energian sijaan, koska käyttövesi halutaan lämmittää tiettyyn lämpötilaan, ja vesivaraaja mitoitetaan käyttötarpeeseen sopivalla tavalla. Yhtälöissä (4.13) ja (4.14) on esitetty, miten CM on laskettu käyttövettä lämmittäessä.

$$p_{yö} \times E_{ao} = p_{päivä} \times E_{ilman} , \quad (4.13)$$

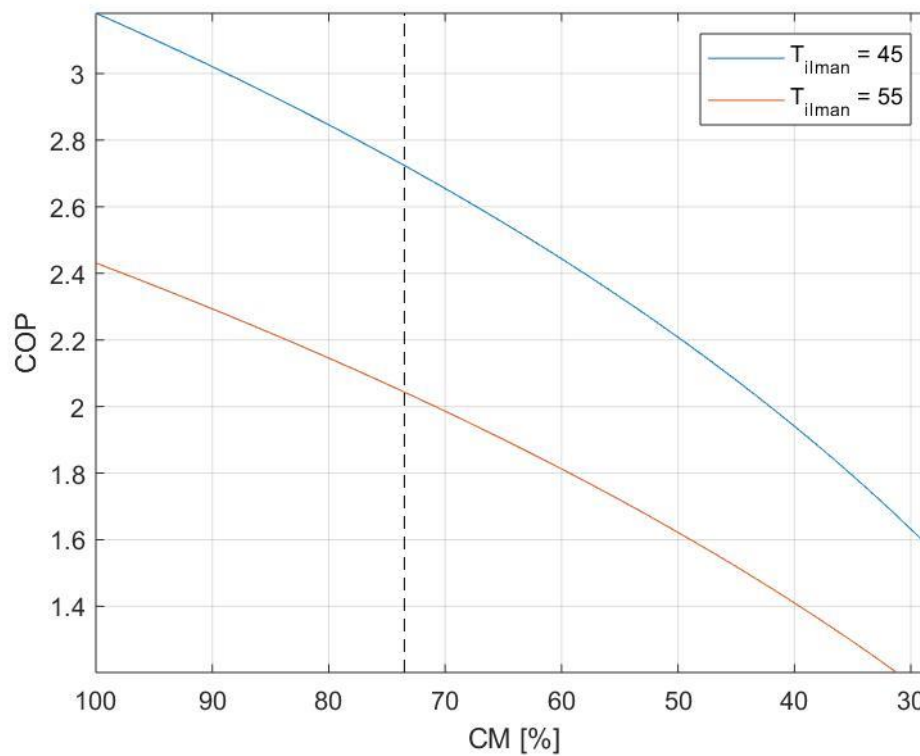
$$CM = \frac{p_{yö}}{p_{päivä}} = \frac{E_{ilman}}{E_{ao}} , \quad (4.134)$$

Käyttöveden lämmityksessä tarvittava vesimäärä on 200 litraa. Veden ominaislämpökapasiteetti on $4.19 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$ ja tiheys on $1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ (Sharma et al. 2009). Pumpun menoveden lämpötila on asetettu aina 5 °C kuumemmaksi kuin kuuman veden tavoitelämpötila, eli päivällä se on aina 50 °C tai 60 °C.

Kuvassa 4.4 on esitetty lämpötilaero, joka on varaajan loppulämpötilan yöllä lämmittämällä ja päivällä lämmittämällä välillä. Kuvassa 4.5 on esitetty varaajan aikaohjauksella tehdyn lämmitysjakson tehokerroin. Kuviin on merkitty mustalla katkoviivalla spot markkinoiden vuoden CM keskiarvo.



Kuva 4.4: Vesivaraajan lämpötilaero aikaohjauksella tehdyn lämmityksen ja ilman aikaohjausta tehdyn lämmityksen välillä. Mustalla katkoviivalla on merkitty Elspot markkinoiden koko vuoden CM keskiarvo.



Kuva 4.5: Aikaohjatun lämpöpumpun COP lämmitysjakson aikana. Mustalla katkoviivalla on merkitty Elspot markkinoiden koko vuoden CM keskiarvo.

Kuvassa 4.4 nähdään että taulukon 2.1 mukaisella spot markkinoiden vuoden *CM* keskiarvolla voidaan, ilman aikaohjausta 55 °C:een lämmitetty vesi, lämmittää 6.45 °C kuumemmaksi eli 61.45 °C:een. Ilman aikaohjausta 45 °C:een lämmitetty vesi, voidaan lämmittää 5.77 °C kuumemmaksi eli 50.77 °C:een. 45 °C lämpötilaan lämmitetyllä vedellä voidaan lämpötilaa nostaa aikaohjauksella suhteessa enemmän (12.8 % kuumemmaksi) kuin 55 °C:een lämmitetyllä vedellä (11.7 % kuumemmaksi), vaikka lämpötilan nousu asteina on suurempi 55 °C:een lämmitetyllä vedellä. Tämä johtuu tehokertoimen pienenemisestä lämpötilan noustessa. Tämä ei kuitenkaan ole erityisen hyödyllistä käyttöveden lämmityksessä, koska oletettavasti vesi halutaan lämmittää juuri niin kuumaksi, että se täyttää lain vaatimuksen sopivalla virhevaralla.

Suomessa lain mukaan kuumen käyttöveden pitää hanasta tullessa olla vähintään 55 °C ja korkeintaan 65 °C. Se on saatava viimeistään 20 sekunnin kuluessa, vaikka veden lämpötila voi johto-osuuksissa olla pienempi (THL 2020). Tämä tarkoittaa, että käytettäessä aikaohjausta tulee lämminvesivaraaja eristää sillä tavalla, että lämmitysjaksojen välissä veden lämpötila ei putoa alle 55 °C:een tai korotata veden lämpötilaa johdoissa. Huomattavaa myös on, että käytetty pumppu voi myös tehdä omat rajoituksensa. Tässä tutkimuksessa käytetyllä pumpulla ei voi lämmittää vettä yli 70 °C lämpötilaan (Nibe 2016).

Aikaohjauksen kannattavuutta nähdään kuvassa 4.4 että jos haluamme 55 °C:sta vettä, on pelkästään yöllä lämmittäminen kannattavaa, jos lämpöhäviöt aiheuttavat alle 6.4 °C lämpötilan alenemisen. Lämpöhäviöitä voisi pienentää sijoittamalla vesivaraaja lämmitettävän rakennuksen sisälle. Kannattavuutta voisi myös parantaa pienentämällä tehokerrointa pienentämällä pumpun menoveden lämpötilaa. Tämä tosin johtaisi huonompaan lämmönsiirtymistehoon pumpun menovedestä käyttöveteen.

Lämmittämisessä aikaohjaus antaa selvän taloudellisen hyödyn, koska vesi voidaan lämmittää kuumemmaksi halvemmalla. Aikaohjauksen käyttäminen osaan lämmittämisestä selvästi kannattaa. Jotta voimme sanoa kannattaisiko todellisuudessa pelkästään yöllä lämmittäminen, tulee selvittää oikeassa vesivaraajassa tapahtuvat lämpöhäviöt ja selvittää kannattavuus, kun verrataan yöllä lämmittämistä osittain yöllä ja osittain päivällä lämmittämiseen, kuten varaajia usein lämmitetään. Tätä selvitystä ei kuitenkaan tehdä tässä työssä.

5. YHTEENVETO

Maalämpöpumput ovat nopeasti yleistynyt lämmitysmuoto. Suomessa vuonna 2011 valittiin maalämpöpumppu lähes 50 %:iin uusista pientaloista. Pumpun suosiota selittää suhteellisen halvat käyttökustannukset ja helppokäyttöisyys. Käyttökustannuksia voidaan pienentää ohjauksella, esimerkiksi sähkön hinnan mukaan.

Tässä kandidaatintyössä oli tavoitteena selvittää maalämpöpumpulla aikaohjauksen kannattavuutta rakennuksen lämmityksessä ja käyttöveden lämmityksessä. Laskennat on suoritettu Niben F1255-12 R EM maalämpöpumpun toiminnasta kerätyn mittausdatan avulla, jonka avulla muodostettiin kyseiselle pumpulle laskennassa käytetty COP käyrä. Päivä- ja yö-sähkön hintaero laskettiin vuoden 2019 Elspot markkinoiden Suomen aluehinnoista. Hinnoissa ei ole otettu huomioon siirtomaksuja tai veroja. Tehokertoimen laskennassa on oletettu rakennusta lämmitettäessä pumpun menoveden olevan 5 °C lämpimämpi kuin varaajan sen hetkinen lämpötila ja käyttöveden lämmityksessä on oletettu pumpun menoveden olevan koko lämmitysajan 5 °C kuumempi kuin käyttöveden tavoitelämpötila.

Rakennuksen lämmittämisessä kannattavuuteen vaikuttaa rakennuksen sopivassa lämpötilassa pitämiseen vaadittava lämpöteho, eli varaajasta rakennukseen siirtyvä lämpöenergia, ja varaajan lämpötila, eli lämmitysjakson keskimääräinen tehokerroin. Pelkästään yöllä lämmittäminen on kannattavampaa, jos yöllä lämmittäminen on halvempaa huomioiden lämmitysjakson huonomman tehokertoimen ja lämpöhäviöt. Rakennuksen lämmittämiseen vertailtiin kahta ohjaustapaa. Joko tuotettiin kaikki tarvittava lämpöenergia yö-sähkön aikana tai tuotettiin lämpöenergia kolmessa erässä: kerran yöllä lämmittämällä ja kaksi kertaa päivällä lämmittämällä. Laskennassa selvitettiin kummalla ohjaustavalla kannattaisi Juha Vanhasen opinnäytetyössä (2019) esitettyä rakennusta lämmitellä, ja vertailtiin lämmittämiseen kolmea eri kokoista betonivaraajaa. Keskimääräisen lämmitysenergian aikana kaikilla kolmella aikaohjaus kannatti, mutta huippulämmitystarpeen aikana yhdelläkään varaajalla kokonaan yöllä lämmittäminen ei kannattanut. Pelkästään yö-sähkön aikaan lämmittämisen kannattavuutta määrittelee lämpövaraajan lämpökapasiteetti ja rakennuksen lämpöenergiantarve. Lämmittämisessä on myös otettava huomioon varaajan lämpötila, käytettäessä lattiaa varaajana. Varaajan lämpenemisen muodostama ongelma voidaan ratkaista käyttämällä varaajaa, jossa on suurempi lämpökapasiteetti, tai erillistä lämpövaraajaa. Erillisessä varaajassa kumminkin tulee todennäköisesti lämpöhäviöistä suurempia, ja investointikustannukset kasvavat. Suuremman varaajan käyttäminen taas vaikuttaa varaajasta huoneeseen johtuvaan lämpötehoon, mitä tässä tutkimuksessa ei huomioitu, sekä tietysti suurempi varaaja on kalliimpi.

Käyttöveden lämmittämisen kannattavuuteen vaikuttaa veden haluttu lämpötila ja vesivaraajassa päivän mittaan tapahtuvat lämpöhäviöt. Mitä enemmän tarvitsee käyttöveteen lämpöä päivällä tuottaa, sitä suurempi lämpötilan nousu voidaan saavuttaa yöllä. Toisaalta lämpöhäviöt myös kasvavat, kun veden lämpötila nousee. Suomen elspot markkinoiden keskimääräisellä yö- ja päivä-sähkön hintaerolla voidaan yöllä lämmittämällä veden lämpötilaa nostaa noin 12 %, samoilla lämmityskustannuksilla. Kannattavuuden määrittelee onko yöllä lämmittäminen halvempaa, kun ottaa huomioon ylimääräinen lämpöenergia joka pitää tuottaa, huonommalla tehokertoimella, että kompensoidaan tapahtuvat lämpöhäviöt. Kannattavuuden laskennassa löydettiin että esimerkiksi, jos halutaan 55 °C vettä, on yöllä lämmittäminen kannattavaa, jos lämpöhäviöt päivän mittaan aiheuttavat alle 6.4 °C lämpötilan laskemisen. Kuitenkin ilman laskentaa todellisessa lämpövaraajassa tapahtuvista lämpöhäviöistä, ei tämän tutkimuksen tuloksilla voi vielä sanoa onko vastaava aikaohjaus todellisuudessa kannattavaa. Tässä tutkimuksessa on myös oletettu lämmityksen tapahtuvan joko yöllä tai

päivällä, mitä todellisuudessa ei todennäköisesti tapahdu. Lämmittäminen yleensä tehdään osittain yöllä ja osittain päivällä. Tässä tapauksessa kokonaan yöllä lämmittämisen kannattavuus tarvitsee jatkotutkimusta. Käyttöveden lämmityksessä on myös huomioitava Suomen lain vaatima 55 °C minimilämpötila. Lämpöhäviöitä voisi pienentää, ja siten kannattavuutta parantaa, sijoittamalla vesivaraaja lämmitetyn rakennuksen sisätiloihin.

Aikaohjaus sekä rakennuksen että käyttöveden lämmityksessä osoittaa potentiaalia. Kuitenkin aikaohjauksen todellisen toteuttamiskelpoisuuden selvittämiseksi tulisi huomioida lämmönsiirtyminen betonivaraajan sisällä ja lattiavaraajalla lämmön siirtyminen huoneilmaan, sekä lämmön siirtyminen lämpöpumpun menovedestä lämpövaraajaan, tarkemman tehokertoimen selvittämiseksi. Tämän tutkimuksen valossa, aikaohjaus on selvästi kannattavaa, kun lämmöntarve on pienempi, mutta toteuttamiskelpoisuus talvella, myöhäissyksyllä ja alkukevällä, vaatii lisätutkimusta.

Jatkotutkimukset aiheesta voisivat kohdistua tutkimaan lämpövaraajan vaikutusta aikaohjauksen kannattavuuteen, huomioon ottaen lämmönsiirtyminen varaajan sisällä ja lämmitystehon, sekä mahdollisesti investointikustannukset. Lisäksi voisi tutkia rakennuksen lämmityksen kannattavuutta, kun ilman aikaohjausta lämmitetään vain kerran päiväsähköllä, tai lämmitetään päiväsähköllä vain puolet siitä mitä yönsähköllä lämmitetään sekä käyttöveden lämmityksen kannattavuutta, kun verrataan kokonaan yöllä lämmitystä, osittain yöllä lämmittämiseen. Mahdollisesti voisi tutkia myös maalämpöpumpulle optimaalista ohjausta jonkin esimerkkikohteen lämmittämiseen. Asiakkaan näkökulmasta voisi tutkia erilaisten sähkösopimusten vaikutusta aikaohjauksen kannattavuuteen.

LÄHTEET

Chuangchid, P. & Krarti, M. 2001. Foundation heat loss from heated concrete slab-on-grade floors. *Building and Environment*, kesäkuu 2001, vol 36.

Juvonen, J. & Lapinlampi T. 2013. Maalämmön hyödyntäminen pientaloissa. [verkkodokumentti]. [Viitattu 29.9.2019]. Saatavissa https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/40953/YO_2013.pdf?sequence=4

Koponen, P., Kärkkäinen, S., Farin, J. & Pihala, H. 2006. Markkinahintasignaaleihin perustuva pienkuluttajien sähkönkäytön ohjaus. [Verkkodokumentti]. [Viitattu: 28.3.2020]. Saatavilla: <https://www.vttresearch.com/sites/default/files/pdf/tiedotteet/2006/T2362.pdf>

Motiva 2019. Maalämpöpumppu, MLP. [Verkkosivu]. [Viitattu 29.3.2020]. Saatavissa: https://www.motiva.fi/koti_ja_asuminen/rakentaminen/lammitysjarjestelman_valinta/lammitysmuodot/maalampopumppu_mlp

Motiva 2017a. Lämpöä omasta maasta. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 28.3.2020]. Saatavissa: http://www.motiva.fi/files/7965/Lampoa_omasta_maasta_Maalampopumput.pdf

Motiva 2017b. Maalämpöpumppu. [Verkkosivu]. [Viitattu: 27.3.2020]. Saatavissa: https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/lampopumput/lampopumpputeknologia/maalampopumppu

Motiva 2017c. Vesikiertoisen lattialämmityksen säätövinkkejä. [Verkkosivu]. [Viitattu: 1.4.2020]. Saatavissa: https://www.motiva.fi/koti_ja_asuminen/ajankohtaista_nyt/lammityskausi_kaynnistyy/vesikiertoisen_lattialammituksen_saatovinkkejä

Schibuola, L., Scarpa, M. & Tambani, C. 2015. Demand response management by means of heat pumps controlled via real time pricing. *Energy and Buildings*, 1 maaliskuuta 2015, Volume 90.

Tahersima, M., Tikalsky, P. & Revankar, R. 2018. An experimental study in using a mass radiant floor with geothermal system as thermal battery of the building. *Building and Energy*, huhtikuu 2018, vol 133.

Taloon 2020. Maalämpöpumppu NIBE F1255 datalehti. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 1.4.2020]. Saatavissa: https://www.taloon.com/media/attachments/nibe/nibe_f1255_invertterilampopumppu.pdf

Rantala, J. & Leivo, V. 2006. Heat loss into ground from a slab-on-ground structure in a floor heating system. *International Journal of Energy Research*, vol 30, issue 12. Lappeenranta: Lappeenranta-Lahden teknillinen yliopisto.

Nibe 2016. Asentajan käsikirja Nibe 1255 Maalämpöpumppu. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 5.4.2020]. Saatavissa: <https://www.nibe.fi/assets/documents/19639/331299-3.pdf>

Nord pool 2020. Day-ahead market. [verkkosivu]. [Viitattu 14.3.2020]. Saatavissa <https://www.nordpoolgroup.com/the-power-market/Day-ahead-market/>

Nord pool 2020. Historical market data. [verkkosivu]. [Viitattu 14.3.2020]. Saatavissa <https://www.nordpoolgroup.com/historical-market-data/>

Partanen, J., Viljainen, S., Lassila, J., Honkapuro, S., Salovaara, K., Annala, S. & Makkonen, M. 2019. Sähkömarkkinat -opetusmoniste. Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto.

Reay, D.A. & MacMichael, D.B.A 1979. Heat pumps: design and application: a practical handbook for plant managers, engineers, architects and designers. Lappeenranta: Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto.

Sharma, A., Tyagi, V.V., Chen, C.R., Buddhi, D. 2009. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. Renewable and Sustainable Energy Reviews.

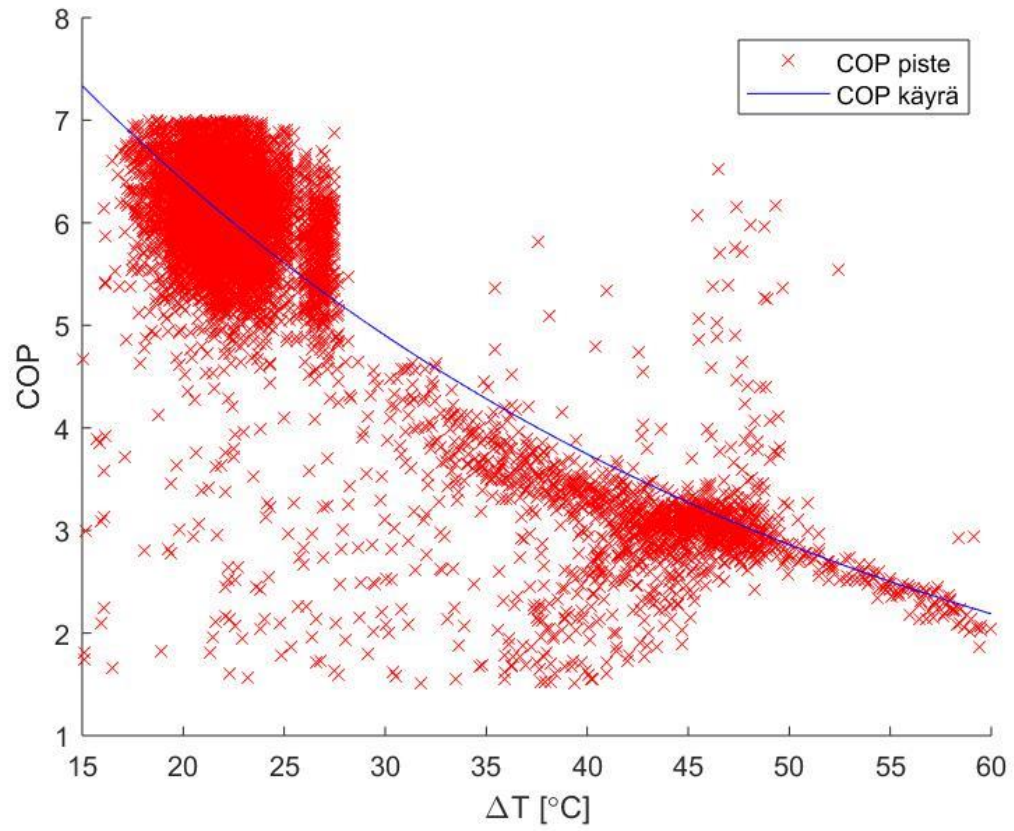
Tame, J.R.H. 2019. Approaches to Entropy. Singapore: Springer.

THL 2020. Vesijärjestelmiin liittyvää suomalaista lainsäädäntöä ja ohjeistoja. [Verkkosivu]. [Viitattu: 1.4.2020]. Saatavilla: <https://thl.fi/fi/web/ymparistoterveys/vesi/legionellabakteerit-vesijarjestelmissa/lainsaadantoa-ja-ohjeistoja>

Vahvanen, J. 2019. Omakotitalon keskuslämmitysjärjestelmän suunnittelu. Lappeenranta: Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto.

LIITTEET

Liite 1. COP pisteet ja COP käyrä.



Liite 2. Esimerkkikohteen lämmitysenergiälaskelma.

Taulukko 2. Lämpövirrat ja maksimilämpötehot.

Johtumislämpöhäviö vuodessa	16034	kWh
Johtumislämpöteho enimmillään	5540	W
Vuotoilman lämmitystarve	2028	kWh
Vuotoilman lämmityksen huipputeho	656	W
Korvausilman lämmitystarve	7720	kWh
Korvausilman lämmityksen huipputeho	2497	W
Lämpökuormien keskiteho	1326	W
Lämpökuormien vuotuinen energia	11616	kWh
Nettolämmitysenergiantarve	14166	kWh
Tilalämmityksen mitoittava huipputeho	7367	W
Käyttöveden lämmitysenergiantarve	4258	kWh
Käyttöveden lämmitysteho	486	W
Lämmitysjärjestelmän maksimiteho	7853	W
Lämmitysenergian vuositarve	18424	kWh

Taulukko 1. Rakennuksen johtumislämpövirrat rakenneosien läpi.

	Pinta-ala [m ²]	U-arvo [W/m ² K]	Johtumislämpövirta 1 [W]	Johtumislämpövirta 2 [W]
Tuparakennuksen ulkoseinä	103	0,22	407,9	1155,7
Siipirakennuksen ulkoseinä	47	0,25	211,5	599,3
Tuvan alapohja	130	0,22	371,8	1315,6
Siiven alapohja	40	0,25	130	460
Yläpohja	170	0,12	367,2	1040,4
Ikkunat ja ovet	19	1,00	342	969
Yhteensä			1830,4	5539,9

$$Q_{\text{kesk}} = 14166 \text{ kWh.}$$

$$q_{\text{maahan,tupa,kesk}} = 371.8 \text{ W}$$

$$q_{\text{maahan,siipi,kesk}} = 130 \text{ W}$$

$$q_{\text{huippu}} = 7367 \text{ W}$$

$$q_{\text{maahan,tupa,huippu}} = 1315.6 \text{ W}$$

$$q_{\text{maahan,siipi,huippu}} = 460 \text{ W}$$

$$Q_{\text{kesk, pl maahäviöt}} = Q_{\text{kesk}} - (q_{\text{maahan,tupa,kesk}} + q_{\text{maahan,siipi,kesk}}) * \frac{8760 \text{ h}}{1000}$$
$$= 9770.5 \text{ kWh}$$

$$q_{\text{huippu, pl maahäviöt}} = q_{\text{huippu}} - (q_{\text{maahan,tupa,huippu}} + q_{\text{maahan,siipi,huippu}})$$
$$= 5591.4 \text{ W}$$

$$Q_{\text{huippu, pl maahäviöt}} = q_{\text{huippu, pl maahäviöt}} * \frac{8760 \text{ h}}{1000} = 48980.7 \text{ kWh}$$

$$Q_{\text{päivätunnit}} = \frac{Q}{365 * 24 \text{ h}} * 15 \text{ h}$$

Lähde: (Vahvanen 2019)