



# Keskilämpötilaohjatun lämmitysjärjestelmän vaikutus rakennuksen energiankulutukseen

Jarkko Leppänen

Opinnäytetyö, AMK

Elokuu 2023

Energia- ja ympäristötekniikka

Leppänen, Jarkko

## Keskilämpötilaohjatun lämmitysjärjestelmän vaikutus rakennuksen energiankulutukseen

Jyväskylä: Jyväskylän ammattikorkeakoulu. Elokuu 2023, 81 sivua

Energia- ja ympäristötekniikan tutkinto-ohjelma. Opinnäytetyö AMK.

Julkaisun kieli: suomi

Julkaisulupa avoimessa verkossa: kyllä

### Tiivistelmä

Toimeksiantaja Tampereen Tilapalvelut Oy on pilotoinut keskilämpötilaohjattuja älykkäitä lämmitysjärjestelmiä. Lämmitysjärjestelmien mahdollistamista taloudellisista hyödyistä, vaikutuksista lämmitysenergian tarpeeseen ja lämmityksen tehohuippuihin tai lämmitystarpeen muodostamiin hiilidioksidipäästöihin ei ole tehty yksityiskohtaista tarkastelua pilotoinnin aikana. Toimeksiantajan tarpeeksi muodostui selkeätulkintainen työkalu, jonka avulla pystyttäisiin tarkistelemaan älykkäiden lämmitysjärjestelmien tuloksia rakennuskohtaisesti ja kokonaisvaltaisesti. Edellä mainittujen vaikutusten lisäksi toimeksiantajan tavoitteena oli varmistaa, että pilotoitujen kohteiden sisäilmaolosuhteet olivat pysyneet terveellisellä ja käyttäjäturvallisella tasolla.

Kohdekohtaiset tiedot toteutuneiden energiankulutusten, tehohuippujen ja päästömäärien osalta saatiin toimeksiantajan käyttämän kulutusseurantajärjestelmän kautta. Kaukolämmön kustannusten tarkastelussa käytettiin Tampereen Sähkölaitoksen vuoden 2022 yrityshinnastoa, koska tarkasteltavat kohteet sijaitsivat kyseisen toimittajan jakelualueella. Järjestelmien käytöstä koituvat mitta-anturien ja palvelumaksujen hinnat perustuivat todellisiin sopimushintoihin, jonka lisäksi kustannuksia koitui järjestelmien välisistä rajapintamaksuista. Tarkasteltavat rakennukset olivat eri vuosikymmenillä rakennettuja, jotta toimeksiantaja pystyi tarkastelemaan mahdollisia eroavaisuuksia älykkäiden lämmitysjärjestelmien soveltuvuudesta uusien ja vanhojen rakennusten välillä.

Tuloksena saatiin Excel-pohjainen laskentataulukko, jonka avulla voitiin verrata toteutuneita energiankulutuksen ja tehohuippujen muutoksia. Näiden lisäksi taulukosta voitiin tarkastella lämmityksen muodostamia päästövaikutuksia eri vuosien ja lämmityskausien välillä. Pilotoinnin taloudellisen kannattavuuden arvioimiseksi taulukosta nähtiin saavutetut hyödyt tai haitat muodostuneiden palvelumaksujen jälkeen. Älykkäiden lämmitysjärjestelmien todettiin pääosin olevan taloudellisesti kannattavia sekä laskevan energiantarvetta ja tehohuippuja.

Laaditun laskentataulukon todettiin soveltuvan älykkäiden lämmitysjärjestelmien vaikutusten arviointiin. Yksityiskohtaisten tarkastelujen myötä pilotoitujen järjestelmien käyttöä voitiin myös perustella jatkettavaksi tulevaisuudessa, vaikka toteutettu tarkastelujakso oli lyhyt.

### Avainsanat (asiasanat)

Kaukolämmitys, kaukolämmön huipputeho, keskilämpötilaohjaus, kysynnänjousto, rakennuksen hiilidioksidipäästöt, rakennusautomaatio, vesikiertoiset lämmitysjärjestelmät, älykkäät lämmitysjärjestelmät, älykäs kaukolämpö.

### Muut tiedot (salassa pidettävät liitteet)

Ei salassa pidettäviä tietoja tai liitteitä

**Leppänen, Jarkko**

**The effects of an average temperature controlled heating system on the building's energy consumption**

Jyväskylä: JAMK University of Applied Sciences, August 2023, 81 pages

Degree Programme in Energy and Environmental Technology. Bachelor's thesis.

Permission for open access publication: Yes

Language of publication: Finnish

### **Abstract**

The assignor company Tampereen Tilapalvelut Ltd. has piloted intelligent heating systems controlled by a building's average temperature. The effects of intelligent heating systems have not been evaluated based on their financial benefits during the piloting period. In addition, the effects in consumption of heating energy, peak powers or building's carbon dioxide emissions have not been under a building specific investigation. The assignor company had a demand for a simple and easily readable tool, which helped the personnel to evaluate the results of using the intelligent heating systems. The tool was ought to show the results for each building individually and for all the prospected buildings. In addition to the evaluations mentioned above, the assignor's goal was to ensure that the indoor air conditions have remained at a healthy and user-safe levels during the pilot.

The information of building based energy consumptions, peak powers and carbon dioxide emissions were taken from a consumption monitoring portal used by the assignor. The evaluations of the district heating's financial effects were based on the Tampereen Sähkölaitos's 2022 prices for businesses as all the investigated buildings were located along the mentioned distributor's region. The use of intelligent heating systems involved certain service and sensor fees. These fees were based on the actual contract prices as well as the interface fee for the data transfer in between the systems. The studied buildings were built in different decades to help the assignor notice possible differences in the use of intelligent heating systems between old and new buildings.

The result was an Excel based spreadsheet that showed the differences in real consumptions and peak powers. The spreadsheet also shows the changes in carbon dioxide emissions from the building's heating. All the results could be evaluated in between individual years and heating seasons. The financial profitability or loss of using piloted systems including all the service fees could also be seen in the spreadsheet. The results showed that the intelligent heating systems turned out financially viable in most of the cases. Also, the energy consumption and peak powers had mostly gone down compared to the previous years. The created spreadsheet was found to be useful for evaluating the benefits of intelligent heating systems. After the building specific evaluations of pros and cons of using the intelligent heating systems the decision was made to extend the pilot even though the experiment time was relatively short.

### **Keywords/tags (subjects)**

District heating, district heating's peak power, average temperature control, elasticity of demand, building's carbon dioxide emissions, building automation, water circulated heating system, intelligent heating systems, intelligent district heating.

### **Miscellaneous (Confidential information)**

No confidential information or attachments

## Sisältö

<b>1</b>	<b>Älykäs kaukolämpö osana hiilineutraalia Tamperetta</b> .....	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>Opinnäytteen lähtökohdat, tavoitteet, rajaukset ja tutkimusmenetelmät</b> .....	<b>8</b>
2.1	Lähtökohdat .....	8
2.2	Työn tavoite ja rajaaminen .....	10
2.3	Aineiston luotettavuuden ja soveltuvuuden arviointi .....	12
2.4	Eettisyys.....	13
<b>3</b>	<b>Energiatehokkuus ja olosuhdetavoitteet</b> .....	<b>14</b>
3.1	Rakennusten energiatehokkuus.....	14
3.2	Sisäilmaolosuhteet ja tavoitelämpötilat .....	16
<b>4</b>	<b>Rakennusten lämmitys</b> .....	<b>17</b>
4.1	Kaukolämpöverkko.....	17
4.2	Rakennusten kaukolämpöjärjestelmä ja sen toimintaperiaate .....	20
4.3	Vesikiertoiset lämmitysjärjestelmät .....	22
4.4	Lämmitysjärjestelmien meno- ja paluulämpötilat .....	24
4.5	Järjestelmäkohtaiset säätömahdollisuudet .....	27
4.5.1	Ilmanvaihto ja tuloilman lämmitys .....	27
4.5.2	Patteri- ja lattialämmitys .....	29
<b>5</b>	<b>Älyohjaukset rakennuksen lämmitysjärjestelmässä</b> .....	<b>31</b>
5.1	Taustat ja tarkastelu.....	31
5.2	Älyohjaus 1 .....	32
5.3	Älyohjaus 2 .....	33
5.4	Älyohjauksen rooli rakennuksen ylläpidon ja lämmöntuotannon näkökulmista .....	34
5.4.1	Hyödyt.....	35
5.4.2	Haasteet.....	36
<b>6</b>	<b>Rakennustyypikohtaiset tulokset</b> .....	<b>38</b>
6.1	Tarkastelussa olleet kohteet .....	38
6.2	Kaukolämmön toteutuneet ja normitetut kulutukset .....	39
6.3	Vaikutukset rakennuksittain eri ohjauksilla .....	40
6.4	Lämmityskauden kulutusvaikutukset.....	44
6.5	Kaukolämpötehojen arvot ja tarkastelu mahdollisiin muutoksiin .....	47
6.5.1	2010- luvun rakennukset .....	47
6.5.2	Muut rakennukset .....	51
6.6	Vaikutus kaukolämmön päästöihin ja kustannuksiin .....	58

6.7 Sisälämpötilojen pysyminen tavoitearvoissa .....	62
<b>7 Yhteenveto ja pohdinta .....</b>	<b>68</b>
7.1 Opinnäytetyön tulokset ja toteutus .....	68
7.2 Rakennusten lämmityksen päästöt ja älykkäät lämmitysjärjestelmät .....	70
<b>Lähteet .....</b>	<b>72</b>
<b>Liitteet .....</b>	<b>76</b>
Liite 1. Tulosten esittelytaulukko .....	76
Liite 2. Tilapalveluiden asiantuntija 1.....	77
Liite 3. Tilapalveluiden asiantuntija 2.....	78
Liite 4. Älyohjaus 1 .....	79
Liite 5. Älyohjaus 2 .....	80
Liite 6. Kaukolämmön tuottaja.....	81
 <b>Kuviot</b>	
 Kuvio 1. Kaukolämmön ominaispäättöjen muutos 1976-2020.....	9
Kuvio 2. Kaukolämmön markkinaosuus uudisrakennuksissa 2021 .....	18
Kuvio 3. Kaukolämmön päästökerroin skenaario .....	18
Kuvio 4. Kaukolämmön energian lähteet 2022.....	19
Kuvio 5. Kaukolämpöjärjestelmän periaatekaavio .....	21
Kuvio 6. Esimerkki patteriverkoston säätökäyrästä ilman suuntaissiirtoa. ....	26
Kuvio 7. Suuntaissiirron vaikutus säätökäyrään ja patteriverkoston menoveden arvoihin. ....	27
Kuvio 8. Tuloilman lämmitys ja lämpötilojen mittauspisteet .....	29
Kuvio 9. Esimerkki lattialämmitysjärjestelmän säätökäyrästä.....	31
Kuvio 10. Saman rakennuksen normitetun energiankulutuksen laskukaava .....	40
Kuvio 11. Ominaiskulutukset palvelusektorilla 2013 .....	41
Kuvio 12. Yleissivistävien oppilaitosten ominaiskulutusten muutokset 2019-2022 .....	42
Kuvio 13. Päiväkotien ominaiskulutusten muutokset 2019-2022 .....	43
Kuvio 14. 2010- luvun rakennusten ominaiskulutusten muutokset 2019-2022 .....	44
Kuvio 15. Älyohjauksen vaikutus lämmityskausien ominaiskulutuksiin [kWh/m <sup>3</sup> ] .....	45
Kuvio 16. Lämmityskausien ominaiskulutusten [kWh/m <sup>3</sup> ] muutokset tarkastelukohteisiin ilman älyohajusta. ....	46
Kuvio 17. Kohdekohtaiset normeerattujen ominaiskulutusten muutokset [kWh/m <sup>3</sup> ] .....	47
Kuvio 18. Kohde 3 kaukolämmön pysyvyyskäyrä .....	48
Kuvio 19. Kohde 5 kaukolämmön pysyvyyskäyrä .....	48

Kuvio 20. Kohde 3 lämmityskauden aikasarja .....	49
Kuvio 21. Kohde 5 lämmityskauden aikasarja .....	49
Kuvio 22. Kohde 1 kaukolämmön pysyvyyskäyrä .....	50
Kuvio 23. Kohde 1 lämmityskausien aikasarja .....	51
Kuvio 24. Kohde 7 kaukolämmön pysyvyyskäyrä .....	52
Kuvio 25. Kohde 7 lämmityskausien aikasarja .....	52
Kuvio 26. Kohde 11 kaukolämmön pysyvyyskäyrä .....	53
Kuvio 27. Kohde 11 lämmityskausien aikasarja .....	53
Kuvio 28. Kohde 12 kaukolämmön pysyvyyskäyrä .....	54
Kuvio 29. Kohde 8 kaukolämmön pysyvyyskäyrä .....	55
Kuvio 30. Kohde 10 kaukolämmön pysyvyyskäyrä .....	55
Kuvio 31. Kohde 13 kaukolämmön pysyvyyskäyrä .....	56
Kuvio 32. Kohde 8 lämmityskausien aikasarja .....	56
Kuvio 33. Kohde 10 lämmityskausien aikasarja .....	57
Kuvio 34. Kohde 13 lämmityskausien aikasarja .....	57
Kuvio 35. Normeeratun kulutuksen mukaiset päästövaikutukset ja tehohuippujen muutokset	59
Kuvio 36. Älyohjauksen mahdollistamat kustannussäästöt .....	61
Kuvio 37. Kohde 5 sisälämpötilojen pysyvyys .....	62
Kuvio 38. Kohde 5 sisälämpötilojen pysyvyys .....	63
Kuvio 39. Kohde 11 lämmityskauden minimi-, maksimi- ja keskilämpötilan trendi.....	64
Kuvio 40. Kohde 11 patteriverkoston menolämpötilan kompensointi ja menoveden lämpötila	65
Kuvio 41. Kohde 4 patteriverkoston menoveden lämpötilat ja sisälämpötilat .....	66
Kuvio 42. Kohde 4 lämpötilatiedot lämmityskauden ajalta.....	67

## Taulukot

Taulukko 1. Mitoituslämpötilat.....	25
Taulukko 2. Tarkasteltavat kohteet .....	38

# 1 Älykäs kaukolämpö osana hiilineutraalia Tamperetta

Tampereen kaupungin tavoite olla hiilineutraali vuoteen 2030 mennessä koostuu monista eri teki-  
jöistä. Kyseinen tavoite ja sen eri osatekijöitä käsittelevä tiekartta on julkaistu vuonna 2020 ja se  
sisältää yhteensä 236 eri toimenpidettä hiilineutraaliustavoitteen saavuttamiseksi. Tässä työssä on  
tarkoitus tarkastella rakennusten energiankulutusta, jolla on keskeinen asema hiilineutraaliusta-  
voitteisiin pääsemisessä. Hiilineutraali Tampere 2030 (2020) tiekartan kohta 122 koskettaa kau-  
pungin kiinteistöjen lämmitystä. Kohta 122 painottaa, että kaupungin kiinteistöissä otetaan käyt-  
töön älykäs kaukolämpö, jonka avulla edistetään kaukolämmön kulutuspiikkien hallintaa ja  
talotekniikan älykkäiden ohjausjärjestelmien käyttöönottoa. Vastuutahoksi tälle tavoitteelle on  
määrätty Tampereen Tilapalvelut Oy, joka toimii tämän kehitystyön toimeksiantajana. (Hiilineut-  
raali Tampere 2030 2020.)

Opinnäytetyö toteutettiin Tampereen Tilapalvelut Oy:lle. Tampereen Tilapalvelut Oy on Tampe-  
reen kaupungin omistama in house- yhtiö, joka huolehtii kiinteistöjen ylläpitopalveluista, raken-  
nuttamishankkeista ja kiinteistökohteiden johtamisesta. Tilapalvelut tuottavat kyseisiä palveluita  
Tampereen kouluille, päiväkodeille, kirjastoille, liikuntapaikoille ja muille kaupungin omistamille  
julkisille kiinteistöille. Tärkein tavoite yhtiöllä on tuottaa laadukkaita rakennuttamishankkeita,  
jotka käsittävät kattavasti hankkeisiin liittyvät palvelut suunnittelusta valvontaan. Toinen tärkeä  
osa palvelua on tarjota kiinteistöjen käyttäjille sujuvaa arkea ammattitaidolla huolletuissa ja ylläpi-  
detyissä rakennuksissa. Arjen helpottamiseksi Tilapalvelut tarjoavat asiakkailleen muun muassa  
kiinteistöhuoltoa, energiajohtamista, sisäilmapalveluita ja tarvittaessa jopa käsityönä tehtyjä puu-  
ja metallityöpalveluita. (Tampereen Tilapalvelut n.d..)

Ensimmäisessä kappaleessa mainittuun hiilineutraaliustavoitteeseen pohjautuen, kaukolämmön  
kysynnänjousto ja älykkäät lämmitysjärjestelmät ovat siis nousseet ajankohtaisiksi aiheiksi hiilidi-  
oksidipäästöjen alentamiseen liittyvien tavoitteiden ja kestävien energiantuotantomuotojen  
ohella. Kaukolämmön tarvetta ohjaavat suurimmat kulutuspiikit etenkin julkisten rakennusten  
kohdalla osuvat arkipäivien aamutunneille, jolloin lämpimän käyttöveden kulutus ja ilmanvaihto-  
laitteiden lämmitystarve ovat etenkin talvikuukausina suurimmillaan. Tämän lisäksi iltapäivän ai-  
kana on koko verkoston osalta havaittavissa kulutuksen kasvua, kun arkitöissä käyvät ihmiset ko-  
tiutuvat. Kaukolämmön tuottajan ja verkoston näkökulmasta nämä kyseiset piikit näkyvät tehoa,

tuottavuutta ja hallintaa heikentävinä tekijöinä. Korkeat piikit kaukolämmön kysynnässä aiheuttavat sen, että riittävä lämpöteho tuotetaan tarvittaessa lämpöenergiaverkostoon liitetyillä huipputehon turvaavilla erilliskattiloilla. Huipputehokattiloiden käyttö ei ole tuottajalle taloudellista, ja ne aiheuttavat perusteholaitoksia korkeampia päästöjä. (Kaukolämmön kysynnänjousto 2015.)

Tampereen kaupungin asettaman tavoitteen myötä Tampereen Tilapalvelut on pilotoinut eri toimijoiden älykkäitä taloautomaatio-ohjelmia, jotta edellä kuvattuja kysyntäpiikkejä voitaisiin välttää tai ainakin madaltaa. Rakennusten näkökulmasta kaukolämmön kysynnänjousto ei ole varsinainen energiansäästökeino, vaikka kaukolämpöverkoston kohdalla toimiikin etenkin kokonaispäästöjä alentavana tekijänä. Lämmitysenergian joustava kysyntä tarkoittaa rakennuksen näkökulmasta sitä, että huipputehon tarvetta pyritään tasaamaan laajemmalle aikavälille. Täten esimerkiksi julkisessa rakennuksessa ei syntyisi aamuista kysyntäpiikkiä. (Kaukolämmön kysynnänjousto 2015.)

Kaukolämpöasiakkaalle suurin suora hyöty kysynnänjouston käytössä liittyykin huipputehomaksuun. Kyseinen maksu on eri kaukolämpöyhtiöiden määrittämä maksu, joka pohjautuu asiakkaan tarvitseman todellisen ja mitatun huipputehon mukaisesti. Tehomaksu yhdessä käytetyn lämmitysenergian määräävän energiamaksun rinnalla muodostavat todellisen kaukolämmön laskutettavan hinnan. (Kaukolämmön kysynnänjousto 2015.) Toimeksiantajan näkökulmasta ylläpitokustannusten madaltaminen suhteellisen pienin investoinnein on houkutteleva vaihtoehto. Mahdollisten säästöjen toteutumisen arvioimiseksi tämän kehittämistyön aikana tarkasteltiin älykkäiden lämmitysjärjestelmien mahdollistamia hyötyjä kustannus- ja päästönäkökulmista. Tämän työn lähtökohdat, tavoitteita ja toteutustapoja tarkastellaan yksityiskohtaisemmin seuraavassa luvussa.

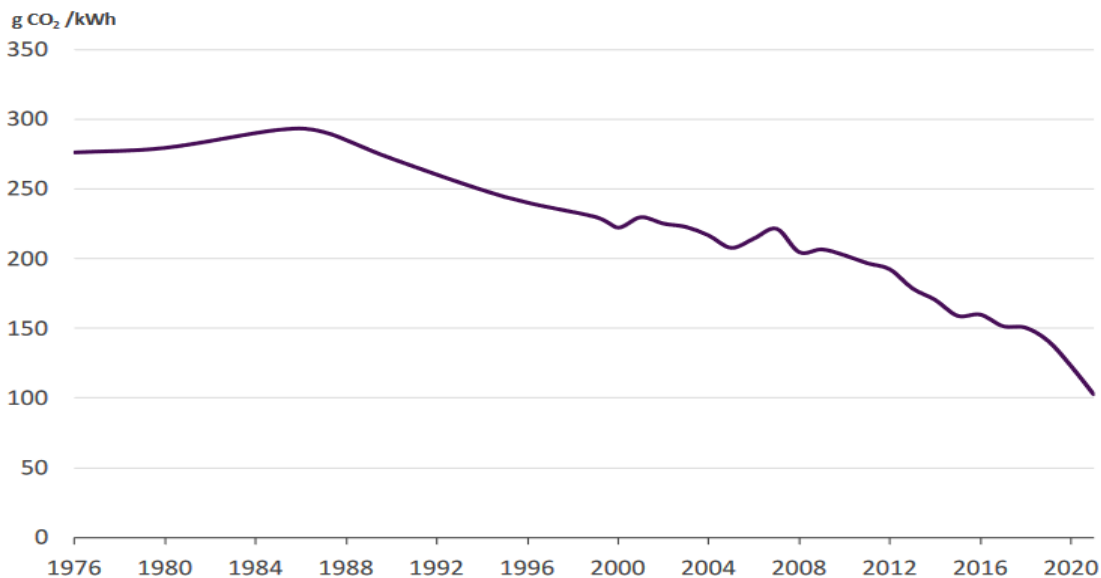
## **2 Opinnäytteen lähtökohdat, tavoitteet, rajaukset ja tutkimusmenetelmät**

### **2.1 Lähtökohdat**

Tampereen kaupunki on määrittänyt, että sen kiinteistöissä käytettävä sähkö- ja lämpöenergia hankitaan uusiutuvista energialähteistä ja kulutusten kehityksiä tulee seurata ja raportoida (Hiili-neutraali Tampere 2030 2020). Kiinteistöjen energiankulutus ja sen seuraaminen on olennainen osa kiinteistöjen ylläpitoa ja käyttäjäystävällisistä olosuhteista huolehtimista. Pelkkä kiinteistön sähkö- ja lämmitysenergian mittauksen suorittaminen päämittaustasolla ei kuitenkaan aina kerro

tarpeeksi energiatehokkuudesta ja mahdollisista ongelmakohtista kiinteistön toiminnassa. Energian kulutuksen ja energiatehokkuuden parantamiseksi onkin syytä kohdentaa energiamittauksia ja ohjauksia kiinteistön eri lämmitysverkostoihin. (ST 21.34.)

Pienten rakennusten kohdalla olosuhteiden ja energiankulutuksen vaihtelut eivät välttämättä näy suurena taloudellisena tai käyttäjäystävällisyyteen vaikuttavana tekijänä. Tämän työn toimeksiantajan, Tampereen Tilapalveluiden, kohdalla puolestaan on kyse jopa sadoista rakennuksista. Kyseisessä mittakaavassa energiatehokkuus ja olosuhteiden seurannan merkitys on jo merkittävä taloudellisessa mielessä sekä terveellisten olojen näkökulmasta ja niiden takaamisessa. Opinnäytetyön aiheen valintaa voidaan pitää ajankohtaisena ja toimeksiantajaa hyödyntävänä Tampereen kaupungin asettamien tavoitteiden sekä nousevien energiamaksujen takia. Kaukolämpöön liitettyjen rakennusten lämmityksen muodostamien hiilidioksidipäästöjen kohdalla suurin yksittäinen vastuu on toki kaukolämmön tuottajalla. Tätä voidaan perustella kuviolla 1, joka kuvastaa kaukolämmön hankinnasta koituvien ominaispäästöjen muutosta. (Kaukolämpötilasto 2021 2022.)



Kuvio 1. Kaukolämmön ominaispäästöjen muutos 1976-2020 (Kaukolämpötilasto 2021).

Päästöjen kehittymisen ja lämmöntuottajan roolista huolimatta rakennusten lämmitysjärjestelmien älykkäällä ohjauksella ja energiatarpeella pyritään edesauttamaan kaukolämpöverkon kokonaistehokkuutta. Sen vuoksi Tampereen Tilapalveluiden ylläpitämän rakennusmassan osuus vaikuttaa omalta osaltaan kaukolämpöverkon hallintaan ja tehokkuuteen. Mahdollisten

energiasäästöjen muodostamat taloudelliset säästöt puolestaan kiinnostavat toimeksiantajaa suuren rakennusmassan ja säästöpotentiaalin tarkastelun takia.

## 2.2 Työn tavoite ja rajaaminen

Älykkäiden lämmitysjärjestelmien pilotointia ja niiden merkittävyyden yksityiskohtaista tarkastelua ei ole toimeksiantajan puolesta aiemmin suoritettu. Toimeksiantajalla on käytössään kahden eri toimittajan älyratkaisuja, jotka ohjaavat tiettyjen rakennusten lämmitysjärjestelmiä olosuhteiden mukaisesti esimerkiksi kysynnänjoustoa noudattaen. Näiden ohjausjärjestelmien hyödyntäminen muodostaa kuukausittaisia palvelumaksuja, rajapintojen muodostamisen ja ylläpidon kuluja sekä toimittajien omien mitta-anturien käyttöön pohjautuvaa laskutusta. Kehitystyönä tehdyn opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia ja tarkastella älykkäiden lämmitysjärjestelmien taloudellisia vaikutuksia ja niiden vaikutuksia lämmitysenergian kulutukseen. Vastaavaa tarkastelua ei aiemmin ole toteutettu toimeksiantajan puolesta, vaan älykkäiden lämmitysjärjestelmien toimintaa on lähinnä seurattu rakennusten lämpötilaolosuhteiden pysyvyyden näkökulmasta.

Kaukolämpöä hyödyntävien rakennusten lämmitystarpeiden muutokset ovat suoraan verrannollisia lämmityksen päästöihin, joten tässä työssä tarkasteltiin samalla myös älyjärjestelmien vaikutuksia lämmityksen muodostamiin hiilidioksidipäästöihin. Tampereen kaupungin ilmastotavoitteet määrittävät kaupungin tavoitteen olla hiilineutraali vuoteen 2030 mennessä. Tämä työ ei toimi todisteena ilmastotavoitteiden saavutusten seurannassa, mutta työn tulosten pohjalta voidaan tarkastella esimerkiksi älykkäiden talotekniikkaohjelmien vaikutusta lämmitysenergian hiilidioksidipäästöjä alentavana tekijänä. Lämmitysenergian kulutuksen lisäksi työssä tarkasteltiin rakennuskohtaisesti lämmityksen tehohuippuja. Näiden vaikutusta koko kaukolämpöverkoston toimintaan ja päästöihin ei voitu arvioida tämän työn rajoissa. Opinnäytetyön myöhemmissä kappaleissa perustellaan, miksi tehohuippujen madaltamiset ovat kaukolämpöverkoston kannalta oleellisia.

Opinnäytetyön tulosten esittäminen rajattiin lämmityksen kustannusten ja päästöjen vaikutusten tarkasteluun, jonka lisäksi sisälämpötilojen pysyvyyttä haluttiin tarkastella. Käytössä olevien älyjärjestelmien käytöstä on sovittu vuoden 2020 lopulla ja ne ovat olleet käytössä vuoden 2021 joulukuusta alkaen. Käyttöönoton jälkeen olosuhteet eivät ole muodostuneet ongelmaksi pilotoiduissa

kohteissa. Täten olosuhteiden tarkempaa tarkastelua ei toteutettu opinnäytetyössä, mutta huomiota kiinnitettiin siihen, että myöhemmin esiteltävät sisälämpötilavaatimukset säilyivät tarkastelluissa kohteissa. Taloudellisia- ja päästövaikutuksia tarkasteltiin tulosten muodossa vain toimeksiantajan näkökulmasta. Teoriapohjassa toki huomioidaan kysynnänjouston vaikutukset, haitat ja haasteet myös kaukolämmön tuottajan näkökulmasta. Työssä saatujen tulosten pienen otannan takia tarkastelua kaukolämpöverkoston osalta ei ollut järkevää tarkastella. Rakennustyyppien osalta työ rajattiin kolmeen eri rakennustyyppiin, jotta vertailu oli mahdollisimman käyttökelpoista ja työmäärä pysyi opinnäytetyön ohjeistuksen mukaisena. Opinnäytetyössä oleellimmat selvitetävät tutkimuskysymykset prioriteettijärjestyksessä:

- Millaisia energian säästöjä tutkittavissa rakennuksissa on saavutettu älykkäällä talotekniikan ohjauksella?
- Onko saavutetut taloudelliset hyödyt suuremmat kuin pilotoitujen ohjausjärjestelmien käytöstä koituvat kustannukset?
- Onko älykkään talotekniikan ohjauksen käyttöönotolla ollut vaikutusta rakennusten lämmitysenergian päästöihin?
- Kuinka hyvin rakennusten sisälämpötilat pysyivät tavoitearvoissa tarkastelujakson aikana?
- Onko erilaisten rakennustyyppien kohdalla havaittavissa eroja älykkään talotekniikan ohjauksen hyödyntämisessä ja toimivuudessa?

Tavoitteiden esittämisessä ja raportoinnissa tavoiteltiin mahdollisimman havainnollistavaa yhteenvedoa taulukkolaskentatyökalun avulla. Yhteenvedosta tulee pystyä tulkitsemaan tarkasteltavien rakennusten taloudellisia vaikutuksia sekä päästömuutoksia rakennuksittain ja kokonaisuudessaan massana. Taloudellisten vaikutusten esittämisessä päädyttiin toimeksiantajan pyynnöstä siihen, että opinnäytetyön yhteydessä julkaistavassa tulostaulukossa taloudellinen hyöty esitetään ”kyllä tai ei”- muodossa. Päästö- ja kustannushyötyjen esittämisen lisäksi rakennukset tulee pystyä ryhmittelemään rakennustyypeittäin näiden keskinäisen verrattavuuden helpottamiseksi. Tehtävän onnistuessa toimeksiantaja voi tulevaisuudessa soveltaa kyseistä taulukkolaskentatyökalua älyohjauksen alaisten kohteiden seurannassa, raportoinnissa ja taloudellisen kannattavuuden toteamisessa.

Kehitystyön teoriaosuuden tavoitteena on esitellä rakennuksissa käytettävät lämmitysjärjestelmät, näiden perinteiset ohjausmenetelmät ja soveltuvuudet eri rakennustyyppihin kirjallisuuslähteiden avulla. Älykkään talotekniikan toteutustapojen, käytettävyyden ja soveltuvuuden osalta kirjallisuuden rinnalla toteutettiin kirjallinen haastattelu Microsoft Forms: in avulla, jossa eri järjestelmien toimittajat, toimeksiantajan asiantuntijat sekä kaukolämmön tuottajan edustaja jakavat

näkökantojaan älyohjauksen merkityksestä ja soveltuvuudesta rakennusten lämmityksen ja käytettävyyden osalta. Haastattelun toteutuksesta kerrotaan tarkemmin kohdassa 5.1. Rakennusten älyohjausmenetelmistä löytyvän kirjallisuustiedon vähäisyyden takia haastattelulla saadaan kehittämistyölle soveltuvaa tietoa todellisesta toimintaympäristöstä (Ojasalo, K. Moilanen, T. Ritalahti, J. 2018, 106).

Lämmitysenergian kulutusten ja päästöjen seurannan todentamiseksi työn aikana oli käytössä Enerkey- järjestelmä, jonka avulla voitiin tarkastella rakennuskohtaisesti kulutusmääriä ja -tehoja tuntitarkkuudella. Enerkey- järjestelmän lisäksi käytössä oli toimeksiantajan käyttämät rakennusautomaatiovalvomot ja älykkäiden taloautomaatio-ohjelmien kehittäjien automaatiovalvomot. Automaatiovalvomoiden avulla voitiin tarkastella ja havainnollistaa mahdollisia suuria poikkeamia lämmitysjärjestelmän toiminnassa tai olosuhteiden muutoksissa.

### **2.3 Aineiston luotettavuuden ja soveltuvuuden arviointi**

Opinnäytetyö toteutettiin kvalitatiivisena ja kvantitatiivisena eli laadullisena ja määrällisenä kehitystyönä, jossa tutkittavia kysymyksiä perusteltiin dokumenttien, havaintojen ja haastattelun muodossa (Kananen 2015, 76). Kirjallisuusaineistona hyödynnettiin pääasiassa lämmitysjärjestelmiä käsitteleviä oppikirjoja sekä kaukolämmön suunnittelun ja käytön oppaita. Opinnäytetyön aiheen puolesta Suomen ympäristöministeriön asetuksia lämmitysjärjestelmien ja rakennusten energiatehokkuuden osalta voitiin hyödyntää teoriaosuudessa. Teoriaosuuden tukena työssä käytettiin sekä ajankohtaisia älykkäitä lämmitysjärjestelmiä käsitteleviä artikkeleita että artikkeleita ja tutkimusraportteja, joissa on tutkittu kaukolämpöjärjestelmän tulevaisuutta.

Kirjallisuusdokumenttien hyödyntämisessä on pyritty käyttämään kotimaisia ja kansainvälisiä lähteitä, jotta näkökulmat soveltuvuuteen alan toiminnan ja kehityksen kohdalla olisivat mahdollisimman kattavia. Primääriaineisto eli opinnäytetyön aihetta koskeva yleisluontoinen havainnointi muodostui Tilapalveluiden asiantuntijoilta saaduista näkemyksistä ja huomioista järjestelmien toiminnan osalta. Huomiot voidaan todeta luotettaviksi, sillä ne olivat osoitettavissa esimerkiksi automaatiovalvomoiden ja mittauslukemien avulla. (Kananen 2015, 76–79).

Työssä käytettyjä lähteitä voidaan yleisesti ottaen pitää luotettavina. Etenkin kirjallisuuslähteet ovat opetusmateriaaleiksi tarkoitettuja, joten niiden sisältöä voidaan pitää puolueettomana faktatietona. Työssä käytettyjen oppaiden ja tutkimusten luotettavuudesta voidaan todeta samaa, koska tutkimukset ovat pääasiassa Energiateollisuuden toteuttamia tai tilaamia ja heidän puolueettomiksi mainitsemia raportteja. Myös lakisäätöiset ja määräysmuotoiset ympäristöministeriön asetukset sekä sähkötiedon ja rakennustiedon oppaat ovat puolueettomia ja luotettavia lähteitä. Artikkeleiden ja verkkojulkaisujen kohdalla luotettavuuteen tuli suhtautua kriittisemmin, koska kyseiset lähdeaineistot keskittyivät älykkäiden lämmitysjärjestelmien mahdollistamiin hyötyihin, mutta haasteita ei varsinaisesti mainittu. Verkkodokumenttien käytössä kiinnitettiin erityistä huomiota siihen, että käytetyt lähdeaineistot oli julkaistu puolueettomiksi tulkituilla verkkosivuilla ja nämä pyrittiin löytämään Jamk: in verkkokirjaston julkaisujen joukosta. Toteutuneiden energiamäärien raportit saatiin energiaraportointiohjelman kautta ja kyseiset energiamäärät toimivat myös laskutuksen perusteina. Energiaraportteja ja käytössä olleita kulutustietoja voidaan pitää luotettavina. (Kananen 2015, 76–79.)

Aiemmin mainitun informoidun verkkokyselyn osalta eri sidosryhmien kanssa sovittiin puhelimitse halukkuudesta osallistua työn tietoperustaan ja vastaamaan Microsoft Forms: in kautta toteutettavaan kirjalliseen haastatteluun. Verkkokyselynä toteutettu haastattelu on tyypillinen määrällisen kehitystyön aineistonkeruun menetelmä (Kananen 2015, 96–99). Kyselyn aikainen vuoropuhelu haastattelijan ja haastateltavien välillä ei ollut riittävän vuorovaikutteinen täyttääkseen laadullisen haastattelun kriteerit (Kananen 2015, 85–87). Haastattelukysymykset olivat kohdistettu eri sidosryhmille yksilöidysti. Kysymykset pyrittiin muodostamaan siten, että vastaukset saataisiin puolueettomina ja toimintaan tai todellisuuteen perustuvia havaintoja kuvastavina. Kaukolämmön tuottajalle esitetyt kysymykset jättivät mahdollisuuden tulevaisuuden spekulatiolle, mutta vastauksilla ei ole suoraa merkitystä tämän työn tuloksiin. Tämän perusteella puolueellisuuden näkökulmaa ei tarvitse sen osalta analysoida tulosten yhteydessä.

## 2.4 Eettisyys

Työssä noudatettiin Jamk: in raportointiohjetta, lähdeviittauksia ja eettisesti tieteellistä käytäntöä. Haastatteluun osallistuvien henkilöiden tietoja ei julkaista eikä heidän nimensä ole työssä näkyvillä. Haastatteluvastaukset ovat säilytetty huolellisesti ja tietoturvallisesti, eivätkä ne ole olleet

julkisesti nähtävillä ennen opinnäytetyön julkaisua. Haastattelukysymysten käytöstä ja julkaisusta on sovittu vastaajien kanssa. (Hyvä tieteellinen käytäntö, tietosuoja ja tutkimuslupa N.d..)

Kohdekohtaisissa tarkasteluissa rakennusten tarkat sijainnit ja nimet eivät ilmene opinnäytetyön tulosten esittelyssä ja kohteiden valikoinnista on sovittu yhdessä toimeksiantajan kanssa. Opinnäytetyölle ei vaadita erillistä tutkimuslupaa eikä opinnäytetyöhön liity erillistä rahoitusta tai salassapitosopimuksia. Työn julkisuudesta on tiedotettu toimeksiantajaa, jonka kanssa on sovittu tulosten esittämiseen liittyvistä periaatteista opinnäytetyösopimuksen laatimisen yhteydessä. Tulosten osalta työssä ei suoraan esitetä euromääräisiä säästöjä tai kustannuksia, vaan tulokset esitetään muulla aiemmin kuvatulla tavalla. (Hyvä tieteellinen käytäntö, tietosuoja ja tutkimuslupa N.d..)

### **3 Energiatehokkuus ja olosuhdetavoitteet**

#### **3.1 Rakennusten energiatehokkuus**

Rakennusten käytöstä koituvien päästöjen ja lämmitystarpeiden ymmärtämiseksi tulee rakennuksen energiatehokkuutta tarkastella eri tekijöiden avulla. Energiatehokkaan kiinteistön toiminta koostuu useasta rakenne- ja talotekniikkaa yhteensovittavasta vaiheesta. Rakennusten sijainti, massoitus, rakennusmateriaalit, lämpö- ja kosteustekninen toiminta sekä ilmatiiveys ovat suuressa asemassa yhdessä tilasuunnittelun kanssa. Näiden arkkitehtuurillisten ja rakenteellisten osa-alueiden lisäksi taloteknisen suunnittelun myötä voidaan optimoida rakennuksille energiatehokkaat lämmitys-, ilmanvaihto-, käyttövesi- ja valaistusjärjestelmät. Rakennusautomaation avulla voidaan huolehtia käytönaikaisesta talotekniikan energiatehokkaasta käytöstä. Rakennusautomaation myötä järjestelmiä voidaan ohjata ja käyttää optimaalisesti ja tarpeenmukaisesti. Automaattisella ohjauksella on merkittävä rooli energiaa käyttävien talotekniikoiden ohjauksessa. (ST-ohjeisto 2020.)

Onnistuneella suunnittelulla taataan hyvät lähtökohdat itse rakennuksen käytönaikaiselle energiatehokkuudelle. Kiinteistöjen energiankulutus on olennainen osa kiinteistöjen ylläpitoa ja käyttäjävälisistä olosuhteista huolehtimista. Pelkkä kiinteistön sähkö- ja lämmitysenergian mittauksen suorittaminen päämittaustasolla ei välttämättä kerro tarpeeksi energiatehokkuudesta ja mahdollisista ongelmakohtista kiinteistön toiminnassa. Energian kulutuksen ja energiatehokkuu-

den parantamiseksi olisikin hyvä kohdentaa energiamittauksia kiinteistön eri lämmitysverkostoihin. (ST 21.34.) Pienten rakennusten kohdalla olosuhteiden ja energian kulutuksen vaihtelut eivät välttämättä näy suurena taloudellisena tai käyttäjäystävällisyyteen vaikuttavana tekijänä. Tämän kehitystyön toimeksiantajan kohdalla puolestaan on kyse jopa sadoista aktiivikäytössä olevista rakennuksista. Tässä mittakaavassa energiatehokkuus ja olosuhteiden seurannan merkitys on jo merkittävä niin taloudellisesti kuin terveellisten olojen näkökulmasta.

Uudisrakennusten kohdalla ympäristöministeriön asetus 718/2020 painottaa, että rakennuksen lämmitysjärjestelmä tulee suunnitella siten, että se toimii käyttötarkoituksen mukaisesti ja rakennuksen automaatio- ja ohjausjärjestelmä toimii energiatehokkaasti varmistuen hyvän, turvallisen ja terveellisen sisäilmaston (A 718/2020, 5§). Järjestelmän mitoituksessa tulee huomioida rakennuksen tekniset järjestelmät, jotta lopputuloksena saadaan mahdollisimman energiatehokas ja sisäolot huomioiva kokonaisuus (A 718/2020, 6§). Säätojärjestelmän tulee pystyä huomioimaan rakennuksen eri lämpökuormat energianhankinnassa. Näitä lämpökuormia ovat esimerkiksi auringon säteily, ihmiset ja valaistus. Energiatehokkaan lämmitysjärjestelmän kohdalla lämmityksen virtauspiirien mahdollisimman alhainen lämpötila ja säädettävyys edesauttavat energiatehokkuutta. (Rakennusten kaukolämmitys 2021.)

Energiatehokkaan kaukolämmityksen varmistamiseksi tulee varmistaa, että lämmityslaitteita tarkastellaan kokonaisvaltaisesti ja mitoitus tulee perustua laskennallisiin tai todellisiin toimintarvoihin. Tila- ja järjestelmäkohtainen ohjaus parantaa energiatehokkuutta ja uudisrakennusten kohdalla tämä tulee ottaa suunnittelussa huomioon. (Rakennusten kaukolämmitys 2021.) Tässä kehittämistyössä ei tarkemmin paneuduta järjestelmien suunnittelu- tai saneerausvaiheen mitoitukseen, mutta näiden osalta Ympäristöministeriöllä on olemassa oma rakentamista koskeva määritelmä, jonka mukaan lämmitystekohdat lasketaan. Etenkin uudisrakennusten kohdalla kaukolämmitysjärjestelmien perusvaatimukseen kuuluu tehontarpeen optimointi. (Rakennusten kaukolämmitys 2021.) Tämä on hyvin olennainen osa tämän kehitystyön tarkastelua, sillä yhtenä optimointikeinona on lyhytaikainen lämmitysjärjestelmien tehontarpeen alentaminen, kun tehontarve toisessa järjestelmässä, esimerkiksi lämpimän käyttöveden kohdalla, kasvaa.

Energiatehokkuuden ja lämmitysjärjestelmien optimaalisen toiminnan tavoittamiseksi olemassa olevien rakennusten lämmitysjärjestelmien kiertovesien lämpötilat ja virtaamat mitataan. Kyseiset

mitatut arvot toimivat lähtötietona järjestelmän saneerauksessa, jossa huomioidaan myös rakennuksen toteutuneet sisälämpötilat ja tarkistetaan tukevatko nämä tarkoituksenmukaisia arvoja. Käyttöveden osalta uusi tai uudet lämmönsiirtimet mitoitetaan uudisrakennusten mukaisesti. Tilojen lämmityksen osalta puolestaan huomioidaan, kuinka alhaiseksi paluueden lämpötila voidaan mitoittaa kunkin lämmitysjärjestelmän kohdalla. Olemassa olevien rakennusten lämmitysverkostojen toimintaa voidaan tarkastella mitattujen virtausten ja rakennuksen lämpötilojen myötä ilman, että lämmitysjärjestelmän osalta suoritettaisiin saneeraustoimenpiteitä. Tämänkaltaisissa tapauksissa energiatehokkuutta voidaan parantaa lämmitysjärjestelmän tasapainotuksen myötä eli verkoston perussäädöllä. Tasaisesti korkeiden huonelämpötilojen vallitessa, voidaan lämmitysjärjestelmän menovesien lämpötiloja laskea energiatehokkuuden parantamiseksi ja sisäilmaolosuhteiden parantamiseksi. (Rakennusten kaukolämmitys 2021.) Lämmitysjärjestelmiä, ensiö- ja toisiopuolia sekä meno- ja paluuvesien lämpötiloja tarkastellaan tarkemmin kappaleissa 4.2.–4.4.

### **3.2 Sisäilmaolosuhteet ja tavoitelämpötilat**

Lämmitysjärjestelmien suunnittelussa ja lämpötilojen määrittämisessä täytyy energiatehokkuuden lisäksi huomioida sisäilmaolosuhteiden määräykset ja tavoitteet. Rakennusten sisäilmaolosuhteet käsittävät sisälämpötilojen osalta lukuisia muitakin tekijöitä, jotka vaikuttavat sisäilman laatuun ja sisäilmastoluokkiin. Lämpötilan lisäksi rakennuksen sisätilojen hiilidioksidipitoisuudet, ilman liikenopeus, akustiikka, valaistus, käytetyt materiaalit ja radonpitoisuudet ovat esimerkkejä sisäilmastoon vaikuttavista tekijöistä. (RT 07-11299 2018.) Tämän kehitystyön osalta sisäilmaolosuhteet eivät ole huonelämpötilaa lukuun ottamatta tarkastelussa, koska käyttäjät eivät ole raportoineet huonoista sisäilmaolosuhteista tarkasteltavien rakennusten osalta.

Sisäilmastoluokilla ja niiden saavuttamiseksi määritellyillä ohjearvoilla pyritään saavuttamaan terveydelliset, turvalliset ja viihtyisät olosuhteet rakennuksen käyttäjille. Lämpötilojen suhteen olemassa olevia sisäilmastoluokituksia sovelletaan pääsääntöisesti uudisrakennuskohteiden suunnittelun kohdalla. Rakennusten suunnittelussa käytetyt sisäilmastoluokitukset määrittävät tavoitetasot, jotka ovat yleisesti päätetty yhdessä rakennusten omistajan, käyttäjän, suunnittelijan ja rakennuttajan kanssa. Aiemmin luetelluilla sisäilmastoon vaikuttaville tekijöille on määritelty ohjearvot, joiden myötä saavutetaan tietyt sisäilmastoluokat. Sisäilmastoluokat koostuvat yksilöllisestä sisäilmastosta (S1), hyvästä sisäilmastosta (S2) ja tyydyttävästä sisäilmastosta (S3). Näissä

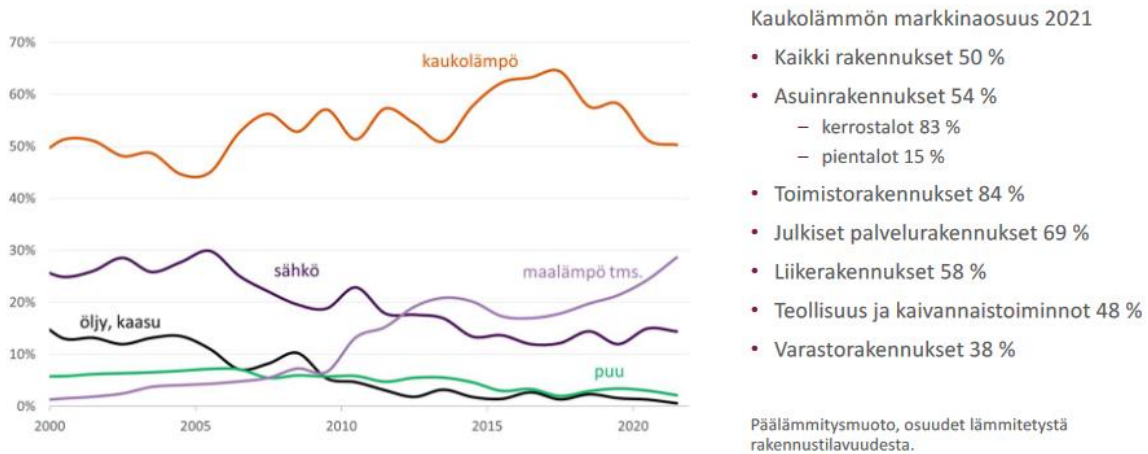
luokissa huoneilman operatiiviset lämpötilat tulisivat pysyä aina 20°C-27 °C välillä sisäilmaluokasta huolimatta. S1 sisäilmaston kohdalla huonelämpötilojen tulisi pysyä 90 % käyttöajasta 21,5°C-24,4°C välillä ja S2 luokassa 90 % käyttöajasta 21,5°C-25,5°C välillä. (RT 07-11299 2018.) Tässä kehitystyössä tarkasteltavien kohteiden kohdalla tavoitellaan S2- luokan sisäilmastoa.

Sisäilmastoluokkien lisäksi sisäilmaston vaatimuksille on myös muita asetuksia. Rakennusten suunnittelussa ja lämpötilojen säätöjen huomioinnissa ympäristöministeriön asetus rakennusten sisäilmastosta ja ilmanvaihdosta määrittää asetusarvot yleispätevämmiin luokituksista riippumattomina. Asetus 1009/2017 määrittää lämmityskauden huonelämpötilan suunnitteluarvoksi 21°C ja lämmityskaudella huonelämpötila saisi vaihdella 20°C-25 °C välillä. Lämmityskauden ulkopuolella huoneilman ylälämpötilan suhteen yläarvo on puolestaan 27°C (A 1009/2017, 4§).

## **4 Rakennusten lämmitys**

### **4.1 Kaukolämpöverkko**

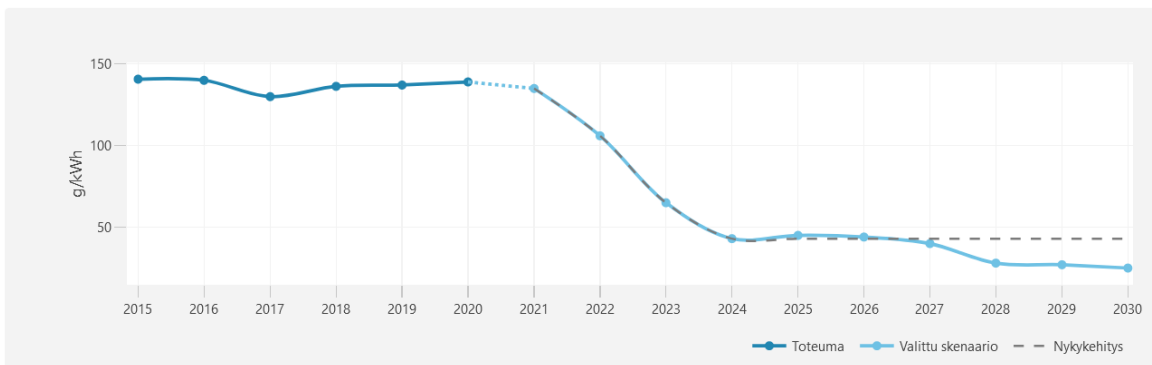
Tässä kehitystyössä tutkittavien rakennusten lämmitysmuotona on kaukolämpö. Sekä Energiavuosi 2022 (2023) julkaisussa että Korkalan teoksessa (2021) osoitetaan, että kaukolämpö on säilyttänyt asemansa Suomen yleisimpänä lämmitysmuotona (Energiavuosi 2022; Korkala 2021). Vuonna 2020 tilastoitujen asuin- ja palvelurakennusten osalta kaukolämmön osuus lämmitysmuotona on 45 % ja kaukolämmön markkinaosuus kaikkien uudisrakennusten osalta vuonna 2021 oli 50 %. Suurimmat rakennustyyppikohtaiset osuudet kaukolämmityksellä olivat toimistorakennukset 84 %, kerrostalot 83 % ja julkiset palvelurakennukset 69 %. (Energiavuosi 2022.) Eri lämmitysmuotojen osuudet ja kaukolämmityksen jakautuminen eri rakennustyyppien osalta ovat esitettyinä kuviossa 2.



Kuvio 2. Kaukolämmön markkinaosuus uudisrakennuksissa 2021 (Energiavuosi 2022)

Kaukolämmön suuren markkinaosuuden perusteella kaukolämmön päästöjen vähentäminen on tärkeä tulevaisuuden kehitysalue. Kaukolämmön tuotannosta koituvien päästökertoimien tulevaisuuden osalta on kehitetty eri skenaarioita, jotka havainnollistavat kuinka kaukolämmön päästökertoimet ja täten päästöt tulevat muuttumaan tulevaisuudessa. Tässä kappaleessa esimerkkinä käytetty kaukolämmön tuotannon päästöskenaario (Kuvio 3) perustuu Tampereen kaupungin ja Tampereen Sähkölaitoksen asettamiin tavoitteisiin (Hiilineutraali Tampere 2030 N.d.).

## Kaukolämmön päästökerroin

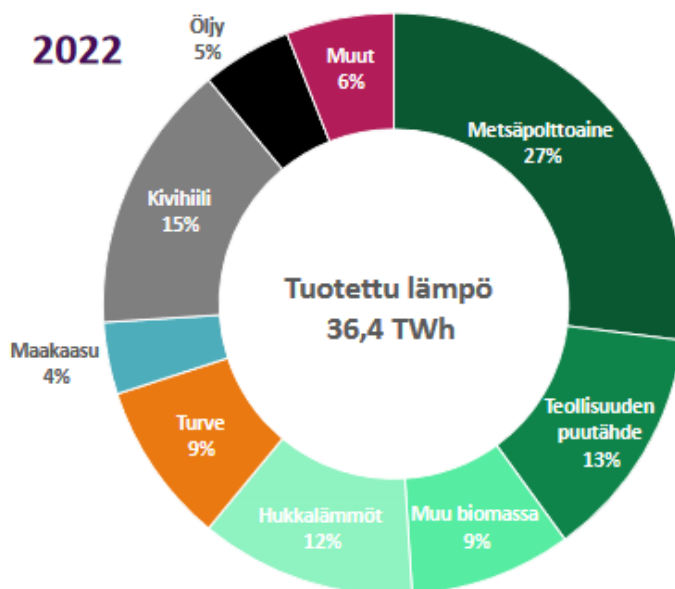


Kuvio 3. Kaukolämmön päästökerroin skenaario (Hiilineutraali Tampere 2030)

Päästöskenaario osoittaa, että nykykehityksen myötä vuoden 2030 kaukolämmön päästökerroin olisi 43 gCO<sub>2</sub> / kWh tasolla. Nykykehityskäyrän ohelle on hahmoteltu skenaario, jonka avulla pääs-

tökerroin vuonna 2030 olisi 25 gCO<sub>2</sub> / kWh. Molemmissa skenaarioissa vuoden 2025 päästökertoimeksi on kerrottu 45 gCO<sub>2</sub> / kWh. Mainittujen päästökertoimien myötä onkin selvää, että kaukolämmityksen alaisten rakennusten lämmityksestä johtuvat päästöt tulevat laskemaan tulevien vuosien aikana. (Hiilineutraali Tampere 2030 N.d..) Päästöjen alentamiseksi kaukolämmön tuotannon ja verkoston on kehityttävä kohti vähäpäästöisempää kokonaisuutta.

Vuoden 2022 kaukolämmön tuotannossa uusiutuvista lähteistä saatu lämpöenergia oli Energiavuoden 2022 esitettyjen lukujen mukaisesti 49 % koko tuotannosta, mikä on kolminkertainen määrä kymmenen vuoden takaiseen verrattuna. Tämän lisäksi hukkalämpöjen osuus on noussut ja nämä kaksi tuotantomuotoa yhdessä kattavat reilusti yli puolet Suomen kaukolämmön tuotannosta. Näiden kehitysten myötä kaukolämmön tuotannon päästöt ovat laskeneet kymmenen vuoden takaisesta noin 190 gCO<sub>2</sub>/kWh päästöarvosta noin 102 gCO<sub>2</sub>/kWh tasolle vuonna 2022. (Energiavuosi 2022.) Kaukolämpöverkoston osalta merkittävänä kehitysaskelena voidaan myös pitää kaukolämpöveden tulolämpötilan laskua. Vuodesta 2021 eteenpäin kaukolämmön tuloveden mitoituslämpötilana käytetään 90° C entisen 115° C sijasta. Alhaisemman mitoituslämpötilan myötä on mahdollista suunnitella alhaisemmalla ja paremmalla hyötysuhteella toimivia kaukolämmön verkostoja sekä energiajärjestelmiä. (Rakennusten kaukolämmitys 2021.)



Kuvio 4. Kaukolämmön energian lähteet 2022 (Energiavuosi 2022).

Matalammat lämpötilat kaukolämpöverkostossa mahdollistavat aiemmin mainittujen energiatehokkaampien toimintaympäristöjen lisäksi kaksisuuntaisen kaukolämpöverkon mallin. Kaksisuuntainen kaukolämmön liiketoimintamallin (2017) julkaisun mukaisesti kaksisuuntainen kaukolämpöverkko tarkoittaa siis teoriassa sitä, että kaukolämpöasiakas voi samalla toimia kaukolämmön tuottajana. Kaksisuuntaisessa kaukolämpöverkossa kaukolämpöenergian tuotanto ei ole ainoastaan perinteisten kaukolämmön tuottajien varassa, vaan myös kaukolämpöasiakkaat voivat myydä omatuotantoaan tai ylijäämälämpöään kaukolämpöverkkoon. (Kaksisuuntaisen kaukolämmön liiketoimintamallit 2017.) Mikäli asiakas kykenee syöttämään suoraan tai teknisten ratkaisujen myötä (esim. lämpöpumppujen avulla) matalalämpöiseen kaukolämpöverkon tulopuolelle yli 65° C:ista vettä, voidaan täten vähentää keskitetyn primäärienergian käyttöä. Asiakkaiden tuottaman tuloveden myötä pystytään myös helpottamaan etenkin talvikuukausien korkeampia kysyntäpiikkejä, joka mahdollistaa kaukolämpöverkon kysyntäjoustomallin, jossa asiakkaiden tuottama lämpö tasaa verkoston primäärilämmöntuotannon vaadetta. (Kaksisuuntaisen kaukolämmön liiketoimintamallit 2017.)

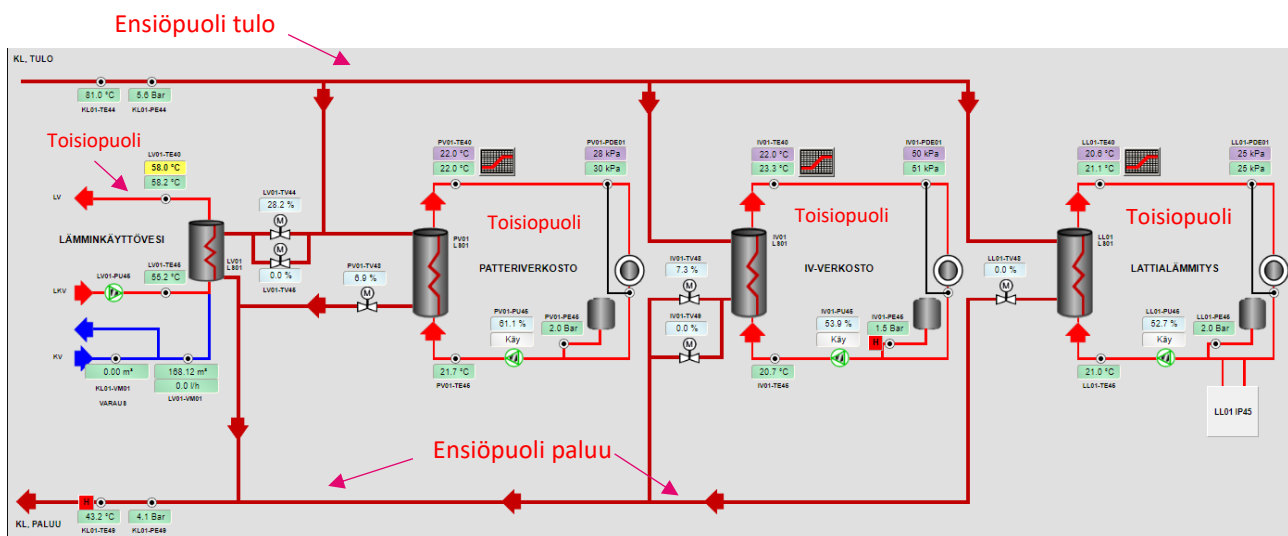
## 4.2 Rakennusten kaukolämpöjärjestelmä ja sen toimintaperiaate

Kaukolämpöverkkoon liitetyissä rakennuksissa rakennusten ja käyttöveden lämmitys toteutetaan kiinteistön lämmönjakokeskuksessa lämmönsiirtimillä. Näiden siirtimien avulla kaukolämpöveden lämpöenergia siirretään lämpimän käyttöveden, lämpimän käyttöveden kierron ja vesikiertoisten lämmityslaitteiden lämmöksi. (Korkala 2021.) Lämmön siirtyminen pohjautuu termodynamiikan toiseen pääsääntöön, jonka mukaisesti lämpöenergia siirtyy korkeammassa lämpötilassa olevasta fluidista (aineesta) matalamman lämpötilan aineen suuntaan. Siirtimessä kaukolämpövesi ei siis sekoitu käyttöveteen tai lämmitysverkostojen veteen, vaan vaihtimessa virratessaan sen lämpöenergia siirtyy siirtimen sisällä nämä vedet erottavan seinämän läpi. (Çengel, Y., Boles, M., Kanoğlu, M. 2019.) Lämmitysmuotona kaukolämpö on yleisesti helppo ja yksinkertainen. Järjestelmän eduiksi voidaan laskea myös pitkä taloudellinen käyttöikä, joka on yleisesti ottaen 25 vuotta. Viimeisten vuosikymmenien aikana kehittyneet lämmönsiirtotekniikat ovat parantaneet kaukolämmön lämmitystehon hyötysuhdetta, jonka myötä kaukolämmöstä saatu lämmitysteho on parantunut. (Korkala 2021; Rakennusten kaukolämmitys 2021.)

Ympäristöministeriön asetuksen 718/2020 mukaan rakennuskohtaiset tekniset järjestelmät ja automaatiojärjestelmät tulee mitoittaa energiakäytöltään mahdollisimman tehokkaiksi (A 718/2020

§6). Lämmitysjärjestelmien osalta optimaalinen ja energiatehokas toiminta toteutuu mahdollisimman alhaisilla lämpötiloilla ja oikean tehontarpeen määrittämisellä (Rakennusten kaukolämmitys 2021). Niiden tulee kuluttaa energiaa mahdollisimman optimoidusti rakennustyypin vaatimukset huomioiden. Tämän lisäksi suunnittelussa on tärkeää huomioida hyvä sisäilmasto ja tilakohtaiset olosuhdevaatimukset. (A 718/2020 §6; Rakennusten kaukolämmitys 2021.)

Kaukolämpöjärjestelmä sijaitsee rakennuksen lämmönjakohuoneessa ja se muodostuu ensiö- ja toisiopuolesta. Ensiöpuolella viitataan kaukolämpöveden virtauspuoleen ja toisiopuolella puolestaan siihen veteen, joka toimii rakennuksen lämpimän käyttöveden ja lämmityslaitteiden lämmitysvetenä. Näitä on pyritty kuvainnollistamaan alla olevassa kuviossa 5. Kaukolämmön ensiöpuolen lämpöenergia siirtyy toisiopuolen veteen lämmönsiirtimien avulla. Toisiopuolen veden kierrosta huolehtii pumput, jotka lämmitysverkostojen kohdalla ovat sijoitettu paluupuolelle ja lämpimän käyttöveden kohdalla lämpimän käyttöveden kierron yhteyteen. (Rakennusten kaukolämmitys 2021; Korkala 2021.)



Kuvio 5. Kaukolämpöjärjestelmän periaatekaavio

Lämmitysjärjestelmien mitoituksen ja toimivuuden osalta täytyy huomioida tietyt ohjeisarvot. Ympäristöministeriön asetus 1047/2017 §6 määrittää, että lämminvesilaitteiston lämmittämän veden lämpötilan on oltava vähintään 55° C ja sen tulee olla saatavilla 20 sekunnin kuluessa. Samaisen veden lämpötila ei saa ylittää arvoa 65° C. (A 1047/2017, §6.) Lämpimän käyttöveden lämmityslaitteet tulisikin suunnitella niin, että lämpimän käyttöveden tavoitelämpötila on 58° C (Rakennusten

kaukolämmitys 2021). Määritettyyn tavoitearvoon pääsemiseksi lämpimän käyttöveden lämmönsiirtimen mitoituslämpötila ensiöpuolen tulo puolella on 70° C ja paluupuolella maksimissaan 20° C. Näillä arvoilla saadaan nostettua toisiopuolen kylmä vesi lämpimän veden minimilämpötilaan 58° C. Laskennallisesti kylmän veden lämpötilan arvo on 10° C. Lämmityslaitteiden ja ilmanvaihdon lämmönsiirtimien osalta ensiöpuolen mitoituslämpötilana tulo puolella käytetään maksimissaan 90° C ja paluupuolella 33° C tai enintään 3° C toisiopuolen paluuta korkeampi. Toisiopuolella mitoituslämpötilat määräytyvät lämmityslaitteiden mukaan ja näitä tarkastellaan tarkemmin seuraavissa kappaleissa. (Rakennusten kaukolämmitys 2021.)

### 4.3 Vesikiertoiset lämmitysjärjestelmät

Tämän kehitystyön seuraavissa kappaleissa käsitellään vesikiertoisia lämmitysjärjestelmiä ja niiden ominaisuuksia, jotta näiden ohjattavuuden mahdollisuuksia on helpompi ymmärtää ja perustella työn myöhemmissä kappaleissa. Esiteltävät lämmitysjärjestelmät ovat kaukolämmitysjärjestelmän toisiopuolen piirissä toimivat lattia- ja patterilämmitys sekä tuloilman lämmitys. Sosiaali- ja terveysministeriön asetuksen 545/2015 nojalla tässä työssä tarkasteltavien rakennusten huoneilman lämpötilojen toimenpiderajat lämmityskaudella ovat välillä 20° C – 26° C (A 545/2015, Liite 1). Tämän lisäksi Suomen ympäristöministeriön asetus 1009/2017 painottaa, että mitoituslämpötilana tulee käyttää arvoa 21° C, jonka lisäksi ilmanvaihdon vaatimuksena on toimia terveellisten, turvallisten ja viihtyisän sisäilman laadun takaajana (A 1009/2017, §4; §8). Työn myöhemmässä vaiheessa tarkastellaan eri järjestelmien mitoituslämpötiloja tarkemmin sekä niiden säädettävyyden merkitystä rakennusten lämmityksessä.

Ilmanvaihdon tuloilman kohdalla lämmitysjärjestelmän tulee taata jatkuva tarpeenmukainen lämmitys. Patteri- ja lattialämmityksen lämmittäessä tiloja riittävästi, tämä voi tarkoittaa, että rakennuksen huoneilmaan puhallettava tuloilma voi olla 15° C – 17° C eli mitoituslämpötilaa selvästi matalammassa lämpötilassa. (Energiatehokas ilmanvaihto 2012.) Koneellisen tulo- ja poistoilmanvaihtojärjestelmän tuloilma on ulkoa otettua ilmaa, joka etenkin tässä työssä tarkasteltavissa rakennuksissa lämmitetään poistoilmasta saatavan lämmön avulla lämmöntalteenottimella (LTO). Tuloilma ottaa poistoilmasta lämpöä sitä paremmin, mitä suurempi lämpötilaero ilmavirroilla on ja mitä paremmalla hyötysuhteella lämmöntalteenotto toimii. (Suomäki & Vepsäläinen 2013, 80–82.)

Ilmanvaihtojärjestelmässä olevan poistoilman lämmöntalteenoton ollessa riittämätön sisään puhallettavan ilman asetustilaa saavuttamiseksi, tulee sisään puhallettavan ilman lämpötila nostaa tavoitearvoon vesikiertoisella lämmityspatterilla, joka saa tarvitsemansa tehon rakennuksen kaukolämpöjärjestelmästä (Suomäki & Vepsäläinen 2013, 86–87). Sisään puhallettavan ilman tulee usein olla huoneilmaa matalammassa lämpötilassa, koska tiheydeltään pienempi lämmin ilmamassa nousee ylös kohti rakennuksen kattoa. Näin ollen huoneilmaa viileämpi sisäänpuhallus silmä sekoittuu paremmin rakennuksen oleskelualueiden vyöhykkeille. (Energiatehokas ilmanvaihto 2012.)

Edellisessä kappaleessa kuvatun tuloilman myötä tapahtuvan lämmityksen ohella vesikiertoiset patterilämmitykset ovat hyvin perinteisiä lämmitysmuotoja isoissa rakennuksissa. Vesikiertoisen patterin avulla tapahtuva lämmitys perustuu lämmön johtumiseen ja lämpösäteilyyn. Kyseinen menetelmä on ollut käytössä 1900-luvun alusta alkaen. (Korkala 2021, 65.) Perinteisin säädöin toimivan patteriverkoston lämpötila määräytyy ulkolämpötilan sekä patterikohtaisten säätöventtiilien mukaan (Suomäki & Vepsäläinen 2013, 60).

Hyvässä tasapainossa olevan verkoston kohdalla lämmönjakokeskuksesta lähtevä toisiopuolen lämmin vesi luovuttaa lämpönsä pattereiden välityksellä rakennusten käyttöön ja jäähtynyt paluuvesi palautuu lämmönjakokeskukseen uudelleen lämmitettäväksi kaukolämpöveden avulla. Huonekohtaiset patteriventtiilit säätävät yksittäisten pattereiden vesivirtaa, jonka avulla voidaan vaikuttaa yksittäisen patterin lämmitystehoon. Nykyajan pattereissa termostaatit kuristavat patterille menevän vesivirran, mikäli se on huonelämpötilakohtaisesti ohjattu ja huonelämpötila ylittää asetetun tavoitearvon. (Korkala 2021, 65–75.) Patteriverkostojen meno- ja paluuvesien mitoituksia ja säätöjä tarkastellaan tarkemmin luvussa 4.4.

Kolmas perinteinen ja tässäkin työssä tarkasteltu lämmitysmenetelmä on lattialämmitys. Lattialämmitys voi toimia sähköisesti tai vesikiertoisesti ja sitä voidaan hyödyntää niin huonekohtaisen kuin koko huoneiston lämmityksen kohdalla. Lattialämmityksen eduksi voidaan lukea sen tasainen lämmitys, sillä oikein asennettuna ja toimivana se lämmittää huoneistoalaa tasaisesti lattian ja katon välillä eli rakennuksen oleskeluvyöhykkeellä. (Korkala 2021, 25.) Lattialämmitysjärjestelmien tulee olla ohjattavissa aina omana järjestelmänään, sillä ne ovat herkkiä liian korkeille lämpöti-

loille. Korkeimmillaan lattialämmityspiirissä kiertävän veden lämpötila saisi olla 45° C, jotta lattialämmityspiirissä käytettävät putket tai lattian rakenne- ja pintamateriaalit eivät vaurioidu (Korkala 2021, 126).

Lämmitystehon ohjattavuuden osalta lattialämmitys toimii huomattavasti hitaammin kuin aiemmin esitellyt ilma- ja patterilämmitykset. Lattialämmitys varaa lämpöä rakenteisiin, jolloin etenkin betonirakenteisissa tiloissa huoneiden lämmitys voi jatkua pitkään, vaikka lämmitysjärjestelmä on ohjautunut pienemmälle teholle tai pois käytöstä. Vastavuoroisesti lämmityksen vaikutus voi kestää muita järjestelmiä kauemmin, jos rakenteet ovat päässeet jäähtymään. (Suomäki & Vepsäläinen 2013, 67.)

Yllä kuvattujen lämmitysjärjestelmien lisäksi rakennuksen lämmönjakokeskuksella on tärkeä rooli lämpimän käyttöveden kohdalla. Luvussa 4.2 on kerrottu tarkemmin, mitä asetus 1047/2017 vaatii lämpimän käyttöveden järjestelmältä ja mitkä ovat järjestelmän suunnittelulämpötilat. Samaisen asetuksen luvun 2 pykälä §8 sekä Korkala (2021) painottavat, että uudisrakennusten kohdalla lämminviesikiertoon ei saa olla yhdistettynä lämmönluovuttimia, eikä lämminkäyttövesi (LKV) saa toimia lattialämmityksen lämmön lähteenä (A 1047/2017, §8; Korkala 2021, 24). Lämpimän käyttöveden yhteyteen on aiemmin voitu yhdistää esimerkiksi pesuhuoneiden ja siivouskomeroiden LKV-pattereita, jotka etenkin kesäisin ovat tuottaneet yllilämpöä näiden tehon mukaan (Korkala 2021, 24). Korjaus- ja muutoskohteissa toki LKV-pattereiden käyttö on vielä sallittua, mikäli niiden huonetilaan kohdistuva lämmön luovutusteho ei ylitä 200 wattia. Lattialämmityspiiriin ei lämmintä käyttövettä sallita enää korjaus- ja muutoskohteiden kohdallakaan. (A 1047/2017, §8.)

#### **4.4 Lämmitysjärjestelmien meno- ja paluulämpötilat**

Luvussa 4.2 on käsitelty joitakin kaukolämpöjärjestelmiä ohjaavia määräyksiä. Tässä alaluvussa käsitellään kaukolämpöjärjestelmän suunnittelussa käytettäviä ensiö- ja toisiopuolten lämpötiloja lämmitysjärjestelmäkohtaisesti radiaattori-, ilmanvaihto- ja lattialämmitykselle sekä lämpimälle käyttövedelle. Alla oleva taulukko 1 kertoo kyseiset lämpötilat ja siinä olevat tiedot perustuvat Energiategollisuuden julkaisuun Rakennusten kaukolämmitys (2021). Lämpimän käyttöveden ohella taulukossa esitellään ainoastaan tilojen lämmitystä koskevat yleiset lämpötilat eli esimerkiksi kosteiden tilojen mitoituslämpötilat eivät ole taulukossa mukana. (Rakennusten kaukolämmitys 2021.)

Taulukko 1. Mitoituslämpötilat (Rakennusten kaukolämmitys 2021)

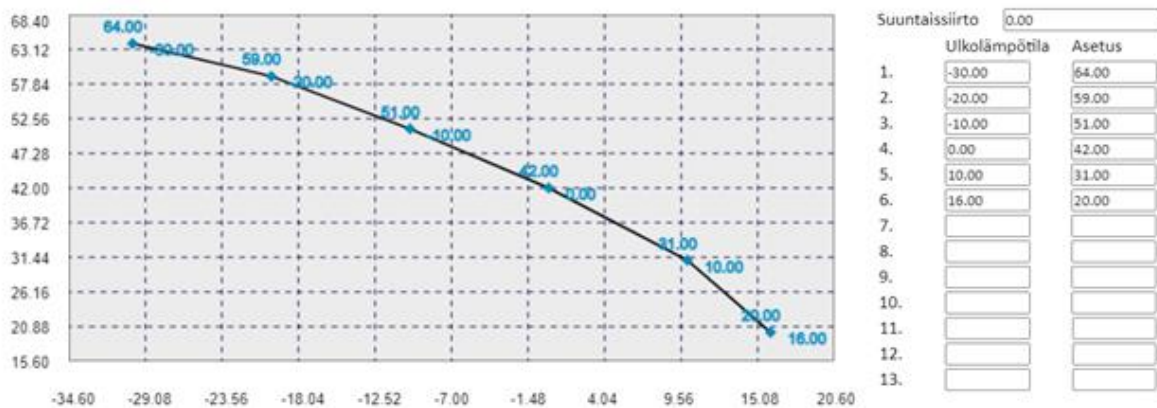
	Lämmönsiirtimien mitoituslämpötilat °C			
	Ensiöpuoli		Toisiopuoli	
	Tulo	Paluu	Meno	Paluu
Lämpimän käyttöveden siirrin	70	20 (max)	10	58 (min)
Lämmitys- ja ilmanvaihdon lämmönsiirtimet (uudisrakennus)	90 (max)	33 (max tai 3° korkeampi kuin toisiopuolen paluu lämpötila)	60	30
Lämmitys- ja ilmanvaihdon lämmönsiirtimet (olemassa oleva rakennus)	90 (max)	43 (...63) (max tai 3° korkeampi kuin toisiopuolen paluu lämpötila)	70	40
Lattialämmityksen lämmönsiirtimet	90 (max)	33 (max tai 3° korkeampi kuin toisiopuolen paluu lämpötila)	40	30

Taulukossa 1:ssä esitetyt arvot ovat siis suunnittelussa tarvittavia mitoituslämpötiloja. Lämmitysjärjestelmäkohtaiset toisiopuolen menolämpötilat perinteisesti määräytyvät säätökäyrän avulla, jonka periaatetta esitellään seuraavaksi yleisellä tasolla ja lämmitysjärjestelmäkohtaisesti. Menolämpötiloja ohjaavat erityisesti ulkolämpötilat eli kylmällä kelillä lämmitysjärjestelmän menoveden lämpötila on korkeampaa kuin lämpimällä kelillä. Säätökäyrille on yleisesti olemassa valmistaja- ja paikkakunta-kohtaiset oletusarvot, mutta ne eivät välttämättä ole kaikille rakennuksille sopivia ja energiatehokkaimpia asetuksia. Jokainen rakennus on oma yksilönsä sen käyttötarkoituksen ja paikkakunta-kohtaisen sijainnin takia. Tämän lisäksi rakenteiden lämmönpitävyys sekä muut lämpövuodot vaikuttavat säätökäyrän asetukseen. Energiatehokkaan ja käyttäjäystävällisen säätökäyrän löytäminen voi viedä useammankin vuoden, jotta eri ulkolämpötiloille löydetään optimaaliset lämmitysverkostojen menovesien lämpötilat. (Suomäki & Vepsäläinen 2013, 60–62.)

Energiatehokkaan säätökäyrän löytämistä voidaan edistää mittaamalla toisiopuolen menoveden lämpötilaa paikallisilla lämpötila-antureilla, joiden avulla varmistetaan lämmitysjärjestelmän toimilaitteiden oikea toiminta. Toisin sanoen mittausten avulla varmistetaan, että menoveden lämpötila vastaa tavoiteltua arvoa. Säätökäyrän määrittämisessä käytetään yleisesti viittä eri pistettä, mutta

niitä voi olla enemmän tai vähemmän. Nämä pisteet asetetaan siten, että ulkoilman mitoituslämpötilan kohdalle asetetaan lämmitysjärjestelmän menopuolen maksimilämpötila ja puolestaan rakennuksen olosuhdemitoituksessa käytettyä sisälämpötilaa vastaava ulkolämpötila on käyrän toinen ääripiste. Näiden pisteiden välille asetetaan yleensä kolme muuta pistettä, joiden avulla tavoitellaan tasaista rakennuksen sisälämpötilaa ympärivuotisesti. (Korkala 2021, 119–120.)

Patteriverkoston kohdalla säätökäyrä ei oikeastaan koskaan ole suora, vaan se on hieman kaareva johtuen vesipattereiden epälinearisesta lämmönluovutuksesta. Suoran säätökäyrän väliarvojen on todettu olevan alle tarvittavan säätöpisteen, jonka myötä menovedelle määrätty lämpötila jää pahimmillaan 2° C alle teoreettisen tavoitetason. Tämä tarkoittaa asteen alenemaa huonelämpötilassa, jos lämpökuormia ei huomioida. (RT 103453 2022.) Rakennusten sisäiset lämpökuormat voivat muodostua esimerkiksi auringon paisteesta, valaistuksesta, kuluttajalaitteista ja rakennuksessa olevista ihmisistä (Myyryläinen, L. 2019, 57). Alla olevan kuvio 6: n kaltainen säätökäyrä kuvastaa sitä, miten ulkoilman lämpötila määrittää patterilämmitysjärjestelmän menoveden tavoitelämpötilan. Tässä esimerkissä menoveden suunnittelulämpötilana on käytetty 64° C. Tyypillinen radiaattoriverkoston maksimilämpötila tässä työssä tarkasteltavissa patteriverkostoissa on 60° C.

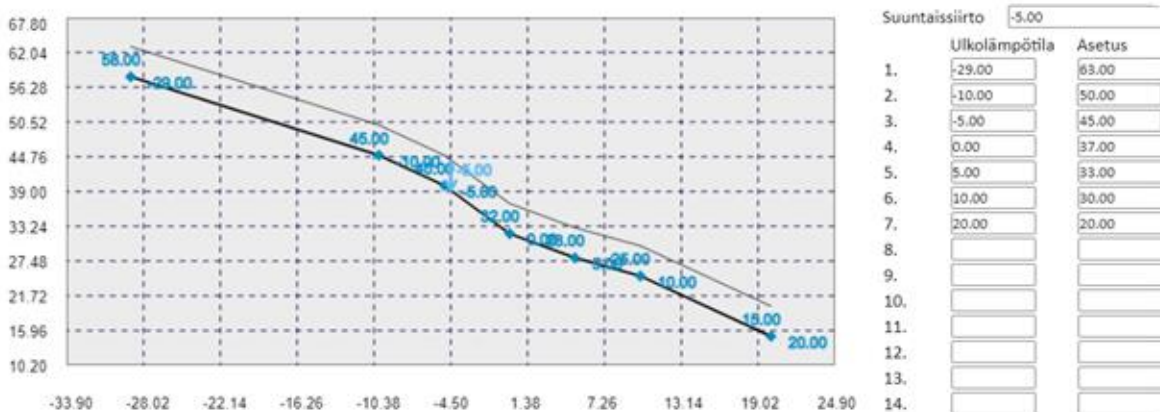


Kuvio 6. Esimerkki patteriverkoston säätökäyrästä ilman suuntaissiirtoa.

Säätökäyrän lisäksi perinteistä lämmitysjärjestelmää voidaan ohjata suuntaissiirron avulla. Suuntaissiirto on toimiva sisälämpötilojen optimointia edistävä menetelmä, jos lämmitysjärjestelmän toiminta ei ole muulla tavoin vioittunut tai epätasapainossa. Näitä vikoja voi olla esimerkiksi lämmityspattereiden säätöventtiilien viat tai ilmanvaihdon epätasaisuus. (Korkala 2021, 120–121.)

Lämmitysjärjestelmän toimiessa tasapainossa, suuntaissiirrolla kyetään ohjaamaan säätökäyrää

takaamaan riittävä sisälämpötila tuulisella ja kostealla säällä. Vaihtoehtoisesti sen avulla sisälämpötilaa voidaan laskea suunnitellusti hetkellisen ja vähäisemmän lämmitystarpeen takia. Energiankulutuksen näkökulmasta säätökäyrällä voi taten olla negatiivisia ja positiivisia vaikutuksia. (Suomäki & Vepsäläinen 2013, 64–65.) Kuviossa 7 osoitetaan, miten suuntaissiirto vaikuttaa 7-pisteiseen säätökäyrään ja lämmitysverkoston menoveden lämpötilaan, kun sitä ohjataan viidellä lämpötila-asteella alaspäin.



Kuvio 7. Suuntaissiirron vaikutus säätökäyrään ja patteriverkoston menoveden arvoihin.

## 4.5 Järjestelmäkohtaiset säätömahdollisuudet

Eri lämmitysjärjestelmien kohdalla säätö- ja valvontatoimintojen automaatiolaitteet ovat pääasiassa toteutettu fyysisten säätö-, ohjaus- ja hälytystoimintojen tehtäviä varten. Tämän ohella ne optimoivat lämmitysverkostoja ohjelmallisesti, jonka lisäksi ne seuraavat ja tilastoivat kulutuslukuja. Lämmitysverkostojen ohjaaminen rakennusautomaation ja logiikan avulla mahdollistavat huonetasoisen tai suuremman kokonaisuuden tarpeenmukaisen ohjauksen. (ST 710.10.) Seuraavissa luvuissa tarkastellaan eri lämmitysjärjestelmille ominaisia säätömenetelmiä.

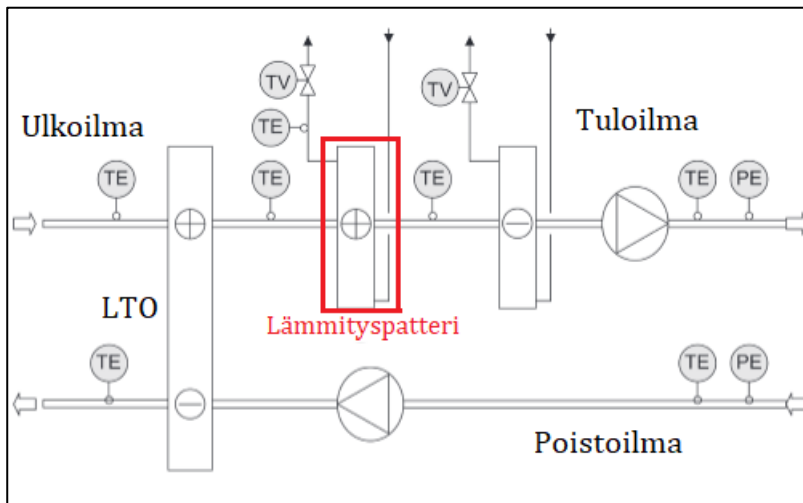
### 4.5.1 Ilmanvaihto ja tuloilman lämmitys

Suurissa rakennuksissa ja etenkin tässä työssä tarkasteltavissa kohteissa ilmanvaihdolla on keskeinen asema rakennuksen käytönaikaisessa lämmityksessä. Lämmityskauden aikana käytössä voi olla vakioarvosäätö, joka määrittää sisään puhallettavan ilman lämpötilan huomioimatta huoneiden lämpötiloja. Joustavampi vaihtoehto on poistoilmaohjattu säätö, jossa automaatio määrittää

tuloilman lämmitystarpeen poistoilman lämpötilan perusteella. Poistoilmaohjattu säätötapa toimii paremmin asetusarvoista huonelämpötilaa tavoiteltaessa. (Suomäki & Vepsäläinen 2013, 85–86.)

Sisäänpuhallusilman lämpötila on rakennuksen ylläpidosta vastaavan asiantuntijan määriteltävissä ja tarkasteltavissa kohteissa se on yleisesti 2°–4° C tavoiteltavaa huonelämpötilaa alempi eli noin 17°C–19° C. Tähän tavoitearvoon pääsemiseksi hyödynnetään poistoilman lämpöenergiaa lämmöntalteenottolaitteiston avulla, jonka lisäksi tuloilman lämpötila nostetaan tavoitearvoon lämmityspatterin avulla, jos tarve vaatii. (Suomäki & Vepsäläinen 2013, 85–89.) Lämmityspattereissa on yleensä käytössä sekoitussäätö, joka optimoi lämmitysveden lämpötilaa patterissa kiertävän veden ja lämmitysjärjestelmän toisiopuolen veden avulla. Kyseinen säätömenetelmä edistää lämmityksen reagointinopeutta ja energiatehokkuutta, sillä lämmityspatterin vesi ohjataan takaisin järjestelmän toisiopuolen paluuedeksi vasta, kun se on luovuttanut riittävästi lämpöä. (Suomäki & Vepsäläinen 2013, 37.)

Ilmanvaihdon ja tuloilman lämmityksen kohdalla voidaan todeta, että alhaisen ulkolämpötilan myötä lämmityspatterin tehontarve kasvaa ja lämmöntalteenoton jälkeinen tuloilman lämpötila määrittää tuloilman lämmittämiseen tarvittavan lämmityspatterin menoveden lämpötilan. Lämmityspatterin menoveden virtausmäärä ja lämpötila säätyvät kyseisen järjestelmän automatiikan avulla, kuten edellisessä kappaleessa on kuvattu ja säätökäyrä suunnitellaan ulkolämpötilojen perusteella. Lämmityspatterin toimivuus on sitä parempi, mitä tarkemmat tuloilman lämpötilan mittaukset ovat ennen ja jälkeen lämmityspatteria. (Suomäki & Vepsäläinen 2013, 85–87.) Alla olevassa kuviossa 8 on esitetty ilmanvaihdon lämpötilojen mittauspisteet (TE), lämmöntalteenottolaite (LTO) ja lämmityspatteri.



Kuvio 8. Tuloilman lämmitys ja lämpötilojen mittauspisteet (ST 710.10)

Edellä mainittujen mittapisteiden ja järjestelmien avulla automaatio pystyy siis määrittämään lämmityspatterin menovedelle tarvittavan lämpötilan. Lämmityspatterin menoveden lämpötilojen säätymisen mukalee perinteistä säätökäyräohjausta ja tuloilman lämmityksen energiatehokkuus ja tehontarve riippuvat pitkälle lämmöntalteenoton tehosta ja lämmityspatterin menoveden ohjauksen toimivuudesta. Näiden lisäksi ilmanvaihdon tarkoituksenmukaiset aikaohjelmat vaikuttavat merkittävästi energiankulutukseen, joten on tärkeää huolehtia, että ilmanvaihto toimii rakennuksen käyttöastetta ja terveydellisiä oloja mukaillen. (Suomäki & Vepsäläinen 2013, 26–27.)

#### 4.5.2 Patteri- ja lattialämmitys

Tuloilman lämmityksestä poiketen vesikiertoinen patteriverkosto tarjoaa paremmat mahdollisuudet tilakohtaisille säädöille. Patteriverkostojen menoveden virtaamia ja lämpötiloja voidaan säätää sekä automaation että käyttäjän toimesta. Käsissäädöllä käyttäjä voi toki vaikuttaa ainoastaan patteriverkoston vesivirtauksen määrään, joka alentaa yksittäisen patterin lämmönluovutustehoa. Perinteiset patteriventtiilit ovat kehittyneet, joten nykyisin vesikiertoisen patterin kohdalla termostaattinen patteriventtiili säätää virtausta ja lämpötehoa sisälämpötilan mukaan. Termostaatin lämpötila-anturi voi olla joko venttiilissä oleva metallinen tunnistin tai vaihtoehtoisesti langaton

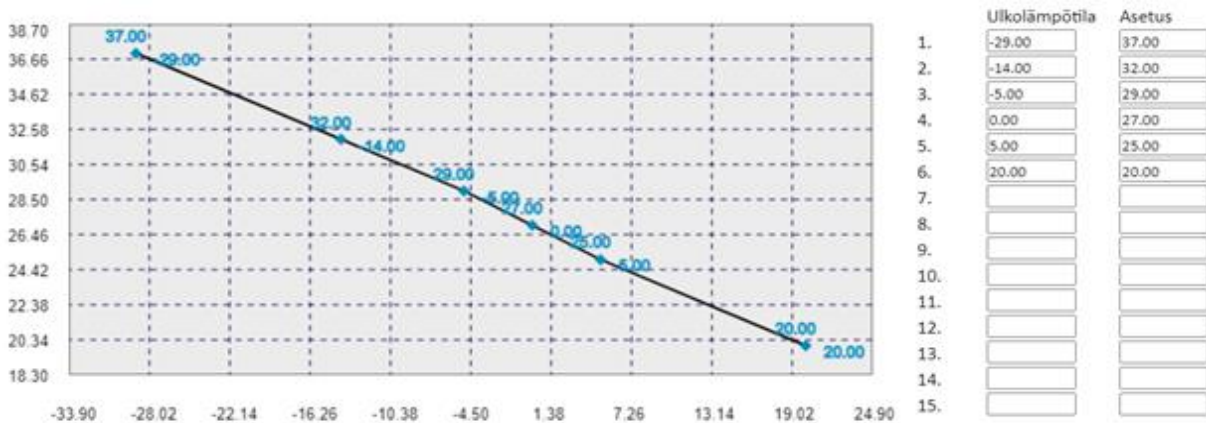
anturi, joka välittää patterin sähköventtiilille huoneen lämpötilatietoa halutusta mittauskohdasta. (Korkala 2021, 66–68.)

Yksinkertainen patteriverkoston automaattiasäätö voi noudattaa säätökäyrämenetelmää, jossa ulkolämpötila määrittää menoveden lämpötilan. Tämä menetelmä tunnetaan myös nimellä ulkolämpötilakompensoitu säätö. Energiatohokkuuden ja sisäilmaston viihtyvyyden parantamiseksi patteriverkoston kohdalla kaskadisäätö tarjoaa paremman vaihtoehdon perinteiselle automaattiasäädölle. Myös sarjasäätönä tunnettu kaskadisäätö huomioi ulkolämpötilan lisäksi tilojen huonelämpötilat. Täten automaatio voi ohjata säätökäyrää suuntaisierroilla lämmitystarvetta parhaiten vastaavaksi, jonka jälkeen patteriverkoston menoveden lämpötila voi joko nousta tai laskea. (Suomäki & Vepsäläinen 2013, 36–37.)

Kaskadisäädön hyödyksi voidaan laskea sen ohjelmitavuus ja soveltuvuus suunnitelluille lämpötilapudotuksille. Suomäki ja Vepsäläinen (2013) kirjoittavat, että huonelämpötilan nostaminen yhdellä asteella yleensä tarkoittaa patteriverkoston menoveden lämpötilan nousua kolmella asteella (Suomäki & Vepsäläinen 2013, 65). Yksittäisen rakennuksen kohdalla voidaan siis saavuttaa huomattavia lämmitysenergian säästöjä, jos sisälämpötiloja voidaan suunnitellusti pudottaa esimerkiksi yöajaksi tai viikonlopuksi. Yleisen nyrkkisäännön mukaan yhden lämpötila-asteen pudotus huonelämpötilassa voi muodostaa 5 % säästön lämmitysenergian kohdalla (Energiansäästö on varautumista 2022). Tämän perusteella voidaan siis huomata, että käyttöaikojen ulkopuolisten huonelämpötilojen laskulla voidaan pienentää energiakuluja, mutta samalla tulee huomioida rakennuksen terveydelliset ja turvalliset olot. Myös rakennuksen sisäiset lämpökuormat voivat alentaa käytönaikaista lämmitystarvetta (Myyryläinen, L. 2019, 38–39).

Patterilämmityksen tavoin kaskadisäätöä voidaan hyödyntää myös lattialämmityksen kohdalla (Suomäki & Vepsäläinen 2013, 67). Perinteisesti lattialämmityksen säätökäyrä on kuitenkin suora, koska lattialämmitys luovuttaa lämpöä patterilämmitystä lineaarisemmin ja lattialämmityksellä pyritään pitämään tasainen sisäolosuhde (RT 103453 2022). Kuten jo aikaisemmin luvussa 4.3 on todettu, lattialämmityksen ohjauksen haasteena on sen hidas reagointi ohjaukseen etenkin lämpöä varaavien betonirakenteisten lattioiden kohdalla. Vaikka lämmityksen viivettä ei voidakaan kokonaan poistaa, voidaan liikalämmitystä ja liian alhaisen lämpötilan muodostumista pienentää koh-

distamalla lämmitysjärjestelmän ohjaus noudattamaan sisälämpötiloja. Tässä menetelmässä sisälämpötilalle annetaan ala- ja ylärajat, jotka antavat lämmityspiirille toimintaluvan. Menoveden lämpötila ja etenkin lämpötilarajat on syytä määrittää jokaiselle rakennukselle erikseen, mutta menoveden lämpötila ei saa ylittää taulukon 1 mukaista 40° C: en ylärajaa. (Suomäki & Vepsäläinen 2013, 67–68.)



Kuvio 9. Esimerkki lattialämmitysjärjestelmän säätökäyrästä.

## 5 Älyohjaukset rakennuksen lämmitysjärjestelmässä

### 5.1 Taustat ja tarkastelu

Rakennusten lämmitysjärjestelmien ohjauksen kehitykseen on etenkin viimeisten vuosien aikana kehitetty uusia älyratkaisuja. Kuten aiemmin tämän työn alussa kuvattiin, asetus 718/2020 ohjeistaa uusien lämmitysjärjestelmien suunnittelua siten, että niissä huomioidaan automaattiset tilakohtaisesti operoivat säätömahdollisuudet vaadittavan sisäilmaston saavuttamiseksi (A 718/2020, §3). Tekniikka & Talous lehdessä julkaistussa artikkelissa Älykäs lämmönsäätö säästää energiaa (2022) kerrotaan, kuinka lämmitystä optimoimalla on saavutettu keskimäärin 10–20 % säästöjä lämmitysenergian osalta. Artikkelissa esitetty optimointi perustuu sisäilman lämpötilan ja sääennusteen mukaiseen ohjaukseen, jonka myötä saavutetaan hyötyjä niin kiinteistön käyttäjän kuin energijärjestelmän kohdalla. (Kailio 2022.) Tässä kehitystyössä tarkastellaan kahden eri toimittajan älyratkaisuja, jotka molemmat pohjautuvat vahvasti sisäilmaolosuhteiden mukaiseen lämmitysjärjestelmien ohjaukseen. Kumpikaan tarkasteltavista palvelun tuottajista ei ole edellä mainitussa artikkelissa esiin noussut toimija.

Järjestelmien toiminnan esittely pohjautuu kirjallisesti tehtyyn haastatteluun, joiden perusteella älyohjaukset 1 ja 2 esitellään seuraavissa alaluvuissa 5.1 ja 5.2. Haastattelut alustettiin puhelimitse älyohjausjärjestelmien edustajien kanssa. Täten pyrittiin pohjustamaan kyselyn tavoitteet ja soveltuvuus opinnäytetyön teoriapohjassa. Molemmat toimijat täyttivät yhden vastauslomakkeen ja vastausten päätavoite oli kuvata järjestelmien toiminta. Kuvauksessa pyrittiin siihen, että edustajat pystyivät kertomaan, miten heidän älyohjauksensa poikkeavat perinteisistä talotekniikan ohjauksista.

Toimeksiantajan kohdalta haastatteluun vastasivat kaksi energia- ja automaatioasiantuntijaa, joilla on kokemusta sekä perinteisten ohjausjärjestelmien ja älyohjausjärjestelmien tarkastelusta. Heidän näkökulmien myötä pyrittiin painottamaan lämmitysjärjestelmien toimivuuden tärkeyttä olosuhteiden ja kustannussäästöjen arvioinnissa. Toimeksiantajan asiantuntijoiden näkemyksillä pystyttiin arvioimaan älyohjausten soveltuvuutta ja mahdollisuuksia kunnallisten kiinteistöjen osalta. Kaukolämmön tuottajan osalta haastattelu toteutettiin yhden toimijan osalta. Työn rajauksen takia kaukolämmön tuottajan näkemys pidettiin kevyempänä ja työssä pyrittiin lähinnä osoittamaan millaisia tulevaisuuden näkymiä älykkäät lämmitysjärjestelmät tarjoavat kaukolämmitysverkon hallinnan ja tehokkuuden näkökulmista.

## 5.2 Älyohjaus 1

Työssä tarkasteltava älyohjaus 1 perustuu sisäilmaolosuhdelähtöiseen ohjaukseen, jossa sisälämpötilan perusteella ohjataan lämmitysjärjestelmiä ja niiden ohjauspisteitä tarpeen mukaisesti. Ohjaus perustuu sekä ennakoivaan että reaktiiviseen ohjaukseen. Ennakoivaan ohjaukseen vaikuttavat sääennusteet, joiden perusteella ohjelma korjaa lämmityksen tarvetta ennakoivasti. Tämän lisäksi älyohjaus 1 optimoi lämmitysjärjestelmää reaktiivisesti käyttöveden huipputehohen aikaan, jolloin sen avulla pyritään ehkäisemään huipputehopiikkejä laskemalla muiden lämmitysverkostojen lämmitystehoa hetkellisesti. Ohjauksen kehittäjällä on myös kaukolämmön kysynnänjousto-ohjaus toiminta, jolla voidaan ohjata suurempaa massaa kiinteistöjä. Kysynnänjousto-ohjelman tavoitteena on edesauttaa kaukolämmön tuotantopiikkien ehkäisyä. (Liite 4 2023.) Tämän työn luovassa yksi mainittujen tuotantopiikkien haittoihin kuuluvat muun muassa kaukolämpötuottajan tuotannolliset haasteet ja huipputehokattiloiden aktivoinnista koituvat korkeammat ilmastopäästöt (Kaukolämmön kysynnänjousto 2015).

Älyohjaus 1 ohjelman alaisia lämmitysjärjestelmiä ohjaa pääosin rakennuksen lämpötilaolosuhteiden keskiarvo. Rakennuksen eri osissa suoritettujen lämpötilamittausten keskiarvon perusteella pyritään löytämään lattialämmitys- ja patteriverkostolle optimaaliset menolämpötilat, joiden avulla taataan rakennuksen tarvetta vastaavat lämpötilat ja pyritään välttämään kaukolämmön kulutuksen tehopiikkejä. Ilmanvaihdon lämmitys ei kuulu älyohjaus 1 alaisuuteen toimeksiantajan kohteissa. Palvelun tuottajan mukaisesti rakennustyyppillä ei ole suurta merkitystä järjestelmän soveltuvuuteen ja tehokkuuteen. Lämmitysenergian säästämisen kohdalla on havaittu parhaina sellaiset kohteet, joissa tiloja on yllä lämmitetty tai käyttöajat ovat selkeät. Kyseisissä tapauksissa lämmitystarvetta voidaan ohjata tarvetta paremmin mukailevaksi. Tämän lisäksi älyohjaus 1 palvelun tuottaja nostaa esille, että kysynnänjousto-ohjelman käyttö soveltuu hyvin korkean lämmönvarauskapasiteetin rakennuksiin, sillä näissä kohteissa pienet sisälämpötilamuutokset on vaikeampi havaita. (Liite 4 2023.)

Ohjelman käytössä erityistä huomiota tulee käyttää kohteissa, joiden lämmitys koostuu useasta eri vaikutusalueesta. Näiden osalta rakennuksen sisälämpötilat voivat poiketa toisistaan, jolloin keskilämpötilan muodostaminen yhdessä alkuperäisen rakennusautomaatiojärjestelmän kanssa voi muodostua haastavaksi. Kyseinen haaste on kuitenkin ratkaistavissa piirikohtaisella lämmitysverkon ohjauksella, jolloin keskilämpötiloja voidaan kohdistaa eri vaikutusalueille. Älyohjaus 1 edustaja toteaa, että alkuperäinen automaatio laajan ja yhdestä lämmityspiiristä koostuvan kohteen kohdalla on useasti ristiriidassa jo lähtökohtaisesti, joten niiden korjaaminen ohjelmallisesti voi olla haasteellista. Kaukolämpökohteissa käytettävät irralliset lämmityslaitteet, kuten ilmalämpöpumput ja lämpöpatterit, voivat myös osoittautua haasteiksi, koska niiden vaikutuksia on hankala määrittää eri alueille. Muita huomioitavia tekijöitä lämmitysjärjestelmien ohjauksessa on lattialämmityksen ja patteriverkoston ohjauksen muutoksen vaikutuksen aikaväli. (Liite 4 2023.) Näiden välillä huomiota tulee kohdistaa lähinnä siihen, että lattialämmityksen reagointi lämmityksen ja jäähtymisen kohdalla on muita lämmitysjärjestelmiä hitaampaa (Suomäki & Vepsäläinen 2013, 67).

### 5.3 Älyohjaus 2

Toimeksiantajan käytössä älyohjauksista toinenkin vaihtoehto keskittyy ohjaamaan lämmitysjärjestelmiä sisäilman keskilämpötilojen perusteella. Tilojen keskiarvolämpötila yhdessä kiinteistön ylläpidon määrittämän tavoitetason kanssa ohjaavat lämmitysjärjestelmän toimintaa. Lähtökohtaisesti älyohjaus 2 on reaktiiviseen ohjaustapaan pohjautuva. Käyttöönoton myötä se hyödyntää

kiinteistöverkostosta kerätystä datasta muodostettua matemaattista mallia, sisäolosuhteiden mitaustietoja sekä sääennustetta. Näiden tietojen perusteella rakennusautomaation säätöarvoja säädetään ennakoimaan muuttuvia olosuhteita. Myös tämän palvelun toimittajalla on valikoimassa kysyntäjoustopalvelu, mutta toimeksiantajan kohteissa tätä tehohuippujen leikkausta ei tämän kehitystyön tarkasteluaikana käytetä. Älyohjaus 2 kohdalla otanta on myös toiseen toimijaan nähden huomattavasti suppeampi, joten tulosten merkityksellisyydet eivät ole täysin verrannollisia keskenään. (Liite 5 2023.)

Älyohjaus 2 menetelmällä ohjataan toistaiseksi vain vesikiertoisia patteriverkostoja ja ilmanvaihtoverkoston lämmitysveden ohjauksen tuotekehitys on toimittajalla pilotointivaiheessa. Patteriverkostojen lämpötilojen ohjaukseen kyseinen menetelmä sopii parhaiten silloin, kun rakennus on osavuorokausikäytössä. Olosuhdemittaukset yhdessä asetettujen ja ajastettujen lämpötilatavoitteiden kanssa mahdollistavat käyttöaikojen ulkopuolisten lämpötilojen turvallisen alentamisen ja täten lämmitysenergiantarpeen vähentämisen. Rakennustyyppien välillä palvelun tuottaja ei näe haasteita, vaan painoarvo ohjauksen toimivuuden takaamiseksi kohdistuu mahdollisimman kattaviin olosuhdemittauksiin. (Liite 5 2023.)

#### **5.4 Älyohjauksen rooli rakennuksen ylläpidon ja lämmöntuotannon näkökulmista**

Tilapalveluiden asiantuntijoiden näkökulmasta älyohjausjärjestelmien tärkein tehtävä on ylläpitää terveelliset sisäilmaolosuhteet eli pitää tilojen lämpötilat halutulla tasolla. Näiden lisäksi mahdollisesti saavutetut kustannussäästöt ja koko energijärjestelmän tasapainoinen toiminta nähdään tärkeinä tekijöinä. (Liite 2 & 3 2023.) Kaukolämmön tuottaja puolestaan kommentoi, että älyohjauksien käyttöaste koko verkoston osalta on niin matala, että kokemuksia ei toistaiseksi ole vielä paljoa. He toki painottivat, että älykkäät lämmitysjärjestelmät ja lämmityksen kysynnänjousto rakennusten kohdalla nähdään positiivisena mahdollisuutena, joka tulee helpottamaan tuotannon tehonhallintaa ja kokonaistehokkuutta. Tuottajan näkökulmasta rooli tulee vielä korostumaan matalalämpöisten kaukolämpöverkkojen kohdalla. (Liite 6 2023.)

Kokeiluvaiheen aikana Tilapalveluiden asiantuntijat kertovat havainneensa, että käytössä olevat älyohjaukset ovat painottuneet hallinnoimaan sisälämpötiloja. Näin ollen esimerkiksi kysynnänjouston rooli on jäänyt toistaiseksi vähemmälle, vaikka kulutustehon piikkien leikkausta on voitu havaita satunnaisten ja yksittäisten kohteiden tarkastelujen myötä. Tärkeimpänä asiana todetaan,

ettei rakennuksen käyttäjien suunnalta ole tullut palautetta heikentyneistä olosuhteista. (Liite 2 & 3 2023.) Lämmityksen ohjauksen suhteen puolestaan nostetaan esille, että tulevaisuudessa älyohjaukset voivat osoittautua huomattavammiksi tekijöiksi lämmityskulujen osalta. Tähän vaikuttaisi etenkin se, jos lämmöntuotannossa ja hinnoittelussa siirryttäisiin sähkömarkkinoiden tyyliseen tuntitasoiseen hinnoitteluun, jossa pääsääntöisesti energian hinta on korkeimmillaan, kun koko jakeluverkoston teho on suurinta. Näin ollen lämmityksen ohjaus edullisemmille tunneille voi osoittautua hyödylliseksi menetelmäksi, kunhan lämmitettävä kohde kykenee varaamaan lämpöä riittävästi eivätkä olosuhteet pääse putoamaan sisäilmaston tavoitetasojen alapuolelle. (Liite 3 2023.)

#### 5.4.1 Hyödyt

Kuten jo aiemmin todettu, älyohjausten ja etenkin kysynnänjouston roolia kaukolämpöjärjestelmien osalta on yleisellä tasolla tarkasteltu lähinnä kaukolämmön tuotannon osalta. Onnistuneesti toteutettu kysynnänjousto voi edesauttaa kaukolämpöverkoston tehokkuutta kustannusten ja tuotannon näkökulmista. Tähän suurimpana syynä on se, että laitoksia ei tarvitse ajaa ylös tai alas, vaan lämpöä voidaan tuottaa tasaisemmin yhteistuotantolaitoksilla, lämpöpumpuilla ja sähkökattiloilla. Lämpöpumppujen ja sähkökattiloiden käyttöä voidaan ajoittaa tunneille, joilla sähkön hinta on alhaisimmillaan, joka osaltaan edistää tuotannon kustannustehokkuutta. (Kaukolämmön kysyntäjousto 2015.) Kulutushuippujen madaltamisen myötä saavutetaan hyötyjä ympäristönäkökulmasta, koska fossiilisten laitosten käyttötarve vähenee tasaisemman lämmön tarpeen myötä (Resurssiviisasta lämpöä kysyntäjoustolla 2020).

Tässä opinnäytetyössä ei arvioida rakennuksia, jotka toimisivat osana kaksisuuntaista kaukolämpöverkkoa. Rakennusten älykkäillä lämmitysjärjestelmillä on kuitenkin matalalämpöverkkojen käyttöä tukevia vaikutuksia ja etenkin kysynnänjoustolla voitaisiin edistää kaksisuuntaisen kaukolämmön toimintamallia ja järjestelmän kokonaistehokkuutta (Kaksisuuntaisen kaukolämmön liiketoimintamallit 2017). Tehonhallinnan ja kokonaistehokkuuden hallinnan ohella kaksisuuntaisen kaukolämmön malli edesauttaa päästöjen vähennystä ja mahdollistaisi alemmat lämmitysenergian hinnat, vaikka sen toteuttamisessa vaaditaankin alkuinvestointeja muun muassa teknologian osalta (Two-way district heating creates a heat trading market for the customer 2016). Tulevaisuudessa ja etenkin uusien kaukolämpöverkkojen kohdalla älykkäiden lämmitysjärjestelmien rooli voi taten olla suuremmassa asemassa kuin tällä hetkellä.

Rakennusten lämmitystarpeen tehopiikkien alentaminen on kaukolämpöasiakkaan näkökulmasta näkyvin hyöty, sillä näiden myötä kaukolämpökustannukset saadaan alemmaksi (Resurssiviisasta lämpöä kysyntäjoustolla 2020). Kysyntäjoustolla ja älykkäällä lämmitysjärjestelmän ohjauksella voidaan vaikuttaa energiatehokkaampaan ja käyttäjäystävällisempään huonelämpötilaan, mikä monessa tilanteessa näkyy energiansäästönä. Osa-aikakäytöllä olevissa rakennuksissa, kuten koulurakennuksissa, älyohjatuilla vesikiertoisilla lämmitysjärjestelmillä kyetään ajoittamaan ja ennakkoimaan lämmitystä järkevästi ja tehokkaasti. Pelkästään vesikiertoisten radiaattoripattereiden älytermostaateilla on saavutettu 10–30 prosentin säästöjä lämmitysenergian osalta. (Talja 2018.)

Valorin tekemä raportti Kaukolämmön kysynnänjousto (2015) tukee jo aiemmin kuvattua Tilapalveluiden asiantuntijan ajatusta siitä, että kysynnänjouston myötä kaukolämmön hinnoittelua voitaisiin ohjata vastaamaan lämmön kysyntää (Kaukolämmön kysyntäjousto 2015 & Liite 3 2023). Tämän mallin myötä lämmöntuotantoa ja käyttöä kyettäisiin tasaamaan, kun käyttäjät ohjaisivat kysyntää edullisemmille tunneille mahdollisuuksien mukaan. Kyseisessä mallissa rakennuksien lämmönvarauskapasiteetti ja käyttöaste vaikuttavat myös siihen, kuinka paljon kysyntää voidaan ohjata. Rakennusten älylämmityksen ja täten sisälämpötilojen osalta suurin potentiaali nähdään kevät- ja syyskausina, jolloin ulkolämpötilat ja keliolosuhteet vaihtelevat reilusti vuorokauden aikana. (Kaukolämmön kysyntäjousto 2015.)

#### **5.4.2 Haasteet**

Älykkäiden lämmitysjärjestelmien ja etenkin kysynnänjouston kohdalla voidaan todeta, että yksittäinen rakennus ei juuri tuota hyötyjä kaukolämpöjärjestelmälle (Kaukolämmön kysyntäjousto 2015). Suurta haittaa tämä ei tietenkään aiheuta toimeksiantajan kaltaiselle tekijälle, jossa ohjataan yksittäisten rakennusten lämmitystarvetta. Olettaen kuitenkin, että älyjärjestelmien käyttö tulee yleistymään tulevaisuudessa, tulee lämmitysjärjestelmien ohjauksen myötä huomioida tiettyjä haasteita, jotka vaikuttava tuottajaan ja kuluttajaan. Monessa rakennuksessa samalla algoritmilla käytössä oleva lämmityksenohjaus voi johtaa verkoston kysyntäpiikin siirtymiseen eri ajankohtaan sen sijaan, että siltä välttyttäisiin. Sama haaste voi ilmetä, jos kaukolämmöntuotannossa siirrytään kysynnän ja tarjonnan mukaiseen futuurihinnoitteluun, joka voi aiheuttaa lisää taloudellisia haittoja kaukolämmön tuottajalle. (Kaukolämmön kysyntäjousto 2015.) Älyjärjestelmien ja kysynnänjouston yleistyessä tuleekin siis huomioida, että ohjauksien avulla voidaan edesauttaa koko järjestelmää ja eri osapuolet saavuttavat taloudellista ja käyttäjäystävällistä hyötyä.

Rakennusten ja älykkäiden lämmitysjärjestelmien käyttäjien kohdalla esille nousee juuri taloudelliset mahdollisuudet ja haasteet. Etenkin kysynnänjouston roolista on pieni otanta, joten on vaikea todentaa, voitaisiinko vastaavat hyödyt saavuttaa esimerkiksi lämpöakun turvin. Tässä työssä keskittyminen on älykkäissä lämmitysjärjestelmissä, joten tarkastelu kohdistuu älyjärjestelmien investointien ja saavutettavien säästöjen vertailuun (Kohta 6.6). Myös liian voimakkaana toteutettu lämmityksen säätö voi aiheuttaa käyttäjäepäystävällisen huonelämpötilan, jos käyttäjät reagoivat lämpötiloihin säätämällä itse lämmitystä ennen kuin järjestelmän säädöt ovat ehtineet vaikuttamaan rakennuksen lämpötiloihin. (Kaukolämmön kysyntäjousto 2015.)

Toimeksiantajan näkökulmasta käytössä olevat keskilämpötilaohjatut lämmitysjärjestelmät ovat toimineet yleisesti hyvin. Joitakin yksittäisiä haasteita on toki noussut ilmi, joiden kohdalla älyjärjestelmissä on vielä kehitettävää tai on todettava, että järjestelmä ei sovi tiettyihin kohteisiin. Esimerkkinä tästä on kohde, jossa keskilämpötilat ohjaavat vesiradiaattoriverkoston lämmitystä. Kohteen lämmitysjärjestelmä on hiljattain uusittu, mutta haasteeksi ilmaantui kylmät lattiat, jotka tuulettuvan alapohjan myötä viilenevät matalilla lämpötiloilla ja vaikuttavat käyttäjään huomattavasti nopeammin kuin keskilämpötilaan ja täten lämmityksen ohjaukseen. (Liite 3 2023.) Rakennusten lämmityksessä haasteeksi saattaa muodostua patteriverkoston epätasapaino, joka jo itsessään aiheuttaa epätasaisia huonelämpötiloja (Liite 4 2023). Tilapalveluiden asiantuntija sekä älyohjauksen 1 toimittajat molemmat toteavat myös, että usean eri käyttäjän rakennuksissa voi syntyä haasteita ohjauksen ja lämpötilojen hallinnassa vaihtelevien lämpökuormien ja käyttöaikojen takia (Liite 3 & 4 2023).

Keskilämpötilan mukaan ohjautuvan lämmitysjärjestelmän haaste useiden erityyppisten käyttäjien rakennuksissa vaikuttaa näkyvimmin huoneilmaston kohdalla. Korkean lämmönvarauskapasiteetin omaavat rakennukset eivät juuri tästä ongelmasta kärsi, koska mitatut lämpötilamuutokset ovat olleet käyttäjille huomaamattomia (Liite 4 2023). Puolestaan rakennuksissa, joissa on julkisia ja toimistotiloja saman keskilämpötilaohjautuvan lämmitysjärjestelmän alla, on havaittu yllämmitystä ja toisaalta alhaisia lämpötiloja. Vastaavassa tapauksessa pienemmän lämpökuorman toimistotilat kärsivät alhaisesta lämpötilasta ja korkeamman lämpökuorman julkiset tilat korkeasta lämpötilasta. (Liite 3 2023.) Vastaavissa rakennuksissa haasteeksi ei siis muodostu taloudelliset kuormitukset lämmityksen lämmitystehotarpeen takia, vaan haaste on sisäilmastoon liittyvä.

## 6 Rakennustyyppikohtaiset tulokset

### 6.1 Tarkastelussa olleet kohteet

Opinnäytetyössä vertailtiin varhaiskasvatuksen ja yleissivistävän oppilaitosten käytössä olevia rakennuksia, joissa osassa on käytössä keskilämpötilaohjattu lämmitysjärjestelmä, ja osassa kyseinen menetelmä ei ole käytössä. Lähtökohtaisesti työssä oli tavoite verrata sekä älyohjaus 1 että älyohjaus 2 menetelmiä. Älyohjaus 2 menetelmän käyttö todettiin liian vähäiseksi, jotta kyseistä ohjausta voitaisiin vielä verrata. Tämän takia työssä päädyttiinkin tarkastelemaan ainoastaan älyohjaus 1 menetelmän vaikutuksia. Tulevaisuudessa opinnäytetyön aikana laadittua taulukkotyökalua voidaan toki soveltaa älyohjaus 2 menetelmään vertailuun. Vertailtavien rakennusten joukkoon valikoitui eri vuosikymmenillä valmistuneita rakennuksia, joissa älyohjauksen avulla säädettiin vesikiertoisia lämmitysjärjestelmiä. Alla olevassa taulukossa (Taulukko 2) osoitetaan tarkemmin kohteiden lämmintilavuus, rakennusvuosi ja käytössä olevat lämmitysjärjestelmät tuloilman lämmityksen lisäksi. Toimeksiantajan pyynnöstä rakennusten nimiä tai osoitteita ei julkaista tässä työssä.

Taulukko 2. Tarkasteltavat kohteet

	Rakennusvuosi	Lämmintilavuus	Älyohjaus käytössä lämmityskaudella 2022–23?	Lämmitysjärjestelmät
<b>Kohde 1</b>	2019	17 380 m <sup>3</sup>	Ei	- Lattialämmitys
<b>Kohde 2</b>	2019	10 650 m <sup>3</sup>	Ei	- Lattialämmitys
<b>Kohde 3</b>	2017	8 852 m <sup>3</sup>	Kyllä	- Lattialämmitys
<b>Kohde 4</b>	2016	33 099 m <sup>3</sup>	Kyllä	- Lattialämmitys - Patteriverkosto
<b>Kohde 5</b>	2014	6 985 m <sup>3</sup>	Kyllä	- Lattialämmitys
<b>Kohde 6</b>	1988	7 676 m <sup>3</sup>	Ei	- Patteriverkosto
<b>Kohde 7</b>	1987	16 570 m <sup>3</sup>	Kyllä	- Patteriverkosto
<b>Kohde 8</b>	1986	21 320 m <sup>3</sup>	Ei	- Patteriverkosto
<b>Kohde 9</b>	1981	5 590 m <sup>3</sup>	Kyllä	- Patteriverkosto
<b>Kohde 10</b>	1957	23 800 m <sup>3</sup>	Ei	- Patteriverkosto
<b>Kohde 11</b>	1954	45 785 m <sup>3</sup>	Kyllä	- Patteriverkosto
<b>Kohde 12</b>	1924	46 693 m <sup>3</sup>	Kyllä	- Patteriverkosto
<b>Kohde 13</b>	1924	29 600 m <sup>3</sup>	Ei	- Patteriverkosto

Kohteiden valinnassa pyrittiin valitsemaan keskenään mahdollisimman vertailukelpoisia kohteita. Lähtökohtana toimi rakennusten lämmitystapa eli kaikki vertailtavat kohteet ovat kaukolämmittäisiä. Toimeksiantaja on toteuttanut useissa hallitsemissaan kohteissa energiasaneerauksia, joten kyseisiä kohteita pyrittiin rajaamaan tarkastelun ulkopuolelle. Poikkeuksena ovat kohteet 4 ja 11, joissa on toteutettu ilmanvaihdon käyntiaikojen muutoksia. Näiden laskennalliset vaikutukset huomioidaan kulutusten osalta, mutta tulosten osalta tulee tiedostaa, että energiankulutusten muutoksiin on vaikuttanut muitakin tekijöitä älyohjauksen lisäksi.

Vertailut kohdistettiin pääasiassa 2010- luvulla ja 1980- luvulla valmistuneisiin rakennuksiin. Tämän lisäksi opinnäytetyössä tarkasteltiin yksittäisesti 1950- luvulla ja 1920- luvulla rakennettuja kohteita. Kaikkien kohteiden osalta kaukolämpöjärjestelmät ovat elinkaarensa ja käyttöikänsä puolesta toimintakuntoisia eli alle 25 vuotta vanhoja (Korkala 2021, 19). Älyohjauksen alaisten kohteiden vertailukohteiksi haettiin saman tilavuusluokan kohteita. Tämä ei kuitenkaan täysin toteutunut, mutta arkkitehtuurillisesti ja rakenteellisesti kohteet ovat toisiaan vastaavia. Tämän perusteella kulutusten muutoksia vertaillaan ominaiskulutuksina kWh/m<sup>3</sup> (per vuosi ja lämmityskausi), jossa vuoden tai lämmityskauden aikana käytetty lämmitysenergia on suhteutettuna rakennuksen lämmitettävään tilavuuteen eli kuutiometriin (Energy consumption in households N.d.).

## 6.2 Kaukolämmön toteutuneet ja normitetut kulutukset

Opinnäytetyössä tarkasteltujen kohteiden osalta todettiin, että näiden toteutuneet ja normeeratut ominaiskulutukset vähenivät tarkastelujakson alkuun verrattuna. Toteutuneella energiankulutuksella kuvataan rakennusten lämmitykseen käytettyä todellista ostoenergian määrää. Normeerattu energiankulutus auttaa ja mahdollistaa rakennusten lämmitysenergiankulutusten vertailun eri vuosien välillä. Normitettu energiankulutus suhteuttaa toteutuneen kulutuksen tilastoidun normaalivuoden arvoksi eli pitkän ajan keskiarvovuotta kuvastavaksi. Lämmitysenergian normituksessa ei huomioida lämpimän käyttöveden lämmitykseen kuluva energiaa, koska se ei ole paikkakunta- tai ulkolämpötilariippuvainen. (Kulutusten normitus 2023.) Alla on esitetty normitetun energiankulutuksen laskentaan tarvittava kaava siinä tapauksessa, kun verrataan samaa rakennusta eri ajankohtina. Tämän opinnäytetyön osalta kaavaa ei kuitenkaan käytetty, koska toteutuneet ja normitetut kulutustiedot saatiin Enerkey- kulutusseurantajärjestelmästä.

$$Q_{norm} = \frac{S_{N\ vpkunta}}{S_{toteutunut\ vpkunta}} \times Q_{toteutunut} + Q_{lämmin\ käyttövesi}$$

Kuvio 10. Saman rakennuksen normitetun energiankulutuksen laskukaava (Kulutuksen normitus 2023)

Kyseisessä laskukaavassa  $Q_{norm}$  viittaa normitetun energiankulutuksen arvoon.  $S_{N\ vpkunta}$  puolestaan kuvaa vertailupaikkakunnan normaalivuoden- tai kuukauden lämmitystarvelukua ja  $S_{toteutunut\ vpkunta}$  tarkasteltavan kuukauden tai vuoden toteutunutta lämmitystarvelukua.  $Q_{toteutunut}$  on toteutuneen energiankulutuksen määrä ilman lämpimän käyttöveden ( $Q_{lämmin\ käyttövesi}$ ) lämmitykseen vaadittavaa laskennallista tai todellista lämmitysenergiämäärää. Mainitut lämmitystarveluvut muodostuvat laskennallisen sisälämpötilan (17 °C) ja tilastoitujen paikkakunta-kohtaisten ulkolämpötilojen suhteesta. Poikkeuksena ovat kevät- ja syyskauden päivät, jos päivän keskilämpötila on kevätkaudella yli 10° C ja syyskaudella yli 12° C. Näissä tapauksissa lämmitystarvelukua ei lasketa. (Kulutuksen normitus – Laskentakaavat ja -ohjeet 2023.)

### 6.3 Vaikutukset rakennuksittain eri ohjauksilla

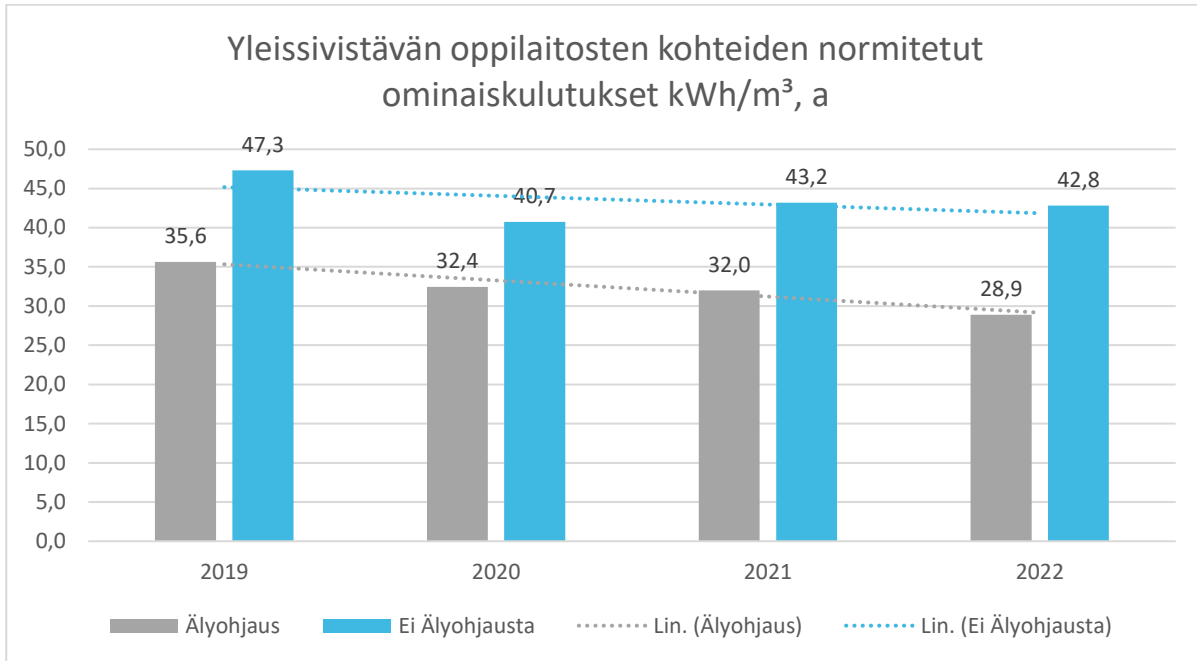
Motivan energiakatselmustietokannasta on saatavilla ominaiskulutustietoa palvelusektorin rakennuksista. Kyseiseen tietokantaan on kerätty energiankulutustietoja vuodesta 1994 alkaen ja viimeisimmät tilastot ovat vuodelta 2021. Energiatehokkuuslain myötä energiakatselmusten määrä on laskenut huomattavasti vuodesta 2013, jolloin yleissivistävien oppilaitosten rakennusten katselmuksia toteutettiin 196 ja päiväkotien kohdalla 89. Motivan verkkosivuilta löytyvästä yhteenvetotaulukosta viimeisimmät yleissivistävien oppilaitosten rakennusten tilastot löytyvät vuodelta 2020, jolloin kohdekatselmuksia on tilastoitu vain 34 kappaletta. (Ominaiskulutukset palvelusektorilla 2023.) Tämän kappaleen jälkeisessä kuviossa (kuvio 11) osoitetaan lämmityksen ominaiskulutuksien tilastoa vuodelta 2013. Vuoden 2020 tilastoitujen yleissivistävien rakennusten mediaani ominaiskulutus on 47,2 kWh/m<sup>3</sup>, joka on vuoden 2013 mediaania suurempi (Ominaiskulutukset palvelusektorilla 2023). Tässä työssä kuitenkin päädyttiin käyttämään vuoden 2013 tilastoa, koska 2010/31/EU rakennusten energiaterhokkuusdirektiivin myötä on syytä olettaa, että 2010- luvun

tarkastelukohteet eivät ole energiakatselmustietokannassa mukana ja vuoden 2013 kohdeotanta on suurin (Direktiivi 2010/31/EU).

Lämpö - ominaiskulutus (kWh/r-m3)											
Tyyppi TK 1994	Kohteita, kpl	Tilavuus, 1000 r-m3	Min	5 %	10 %	Alakv	Mediaani	Ylakv	90 %	95 %	Max_lämpö
<b>51 Yleissivistävien oppilaitosten rakennukset</b>											
511 Yleissivistävien oppilaitosten rakennukset	196	5413	7.5	26.0	28.9	35.7	43.5	52.7	64.8	72.1	126.0
15 Toimistorakennukset	122	5795	4.4	15.4	20.0	26.8	33.3	40.6	56.0	79.8	209.9
<b>23 Muut sosiaalitoimen rakennukset</b>											
231 Lasten päiväkodit	89	558	12.4	26.3	33.9	48.9	61.3	75.6	95.7	106.3	159.5

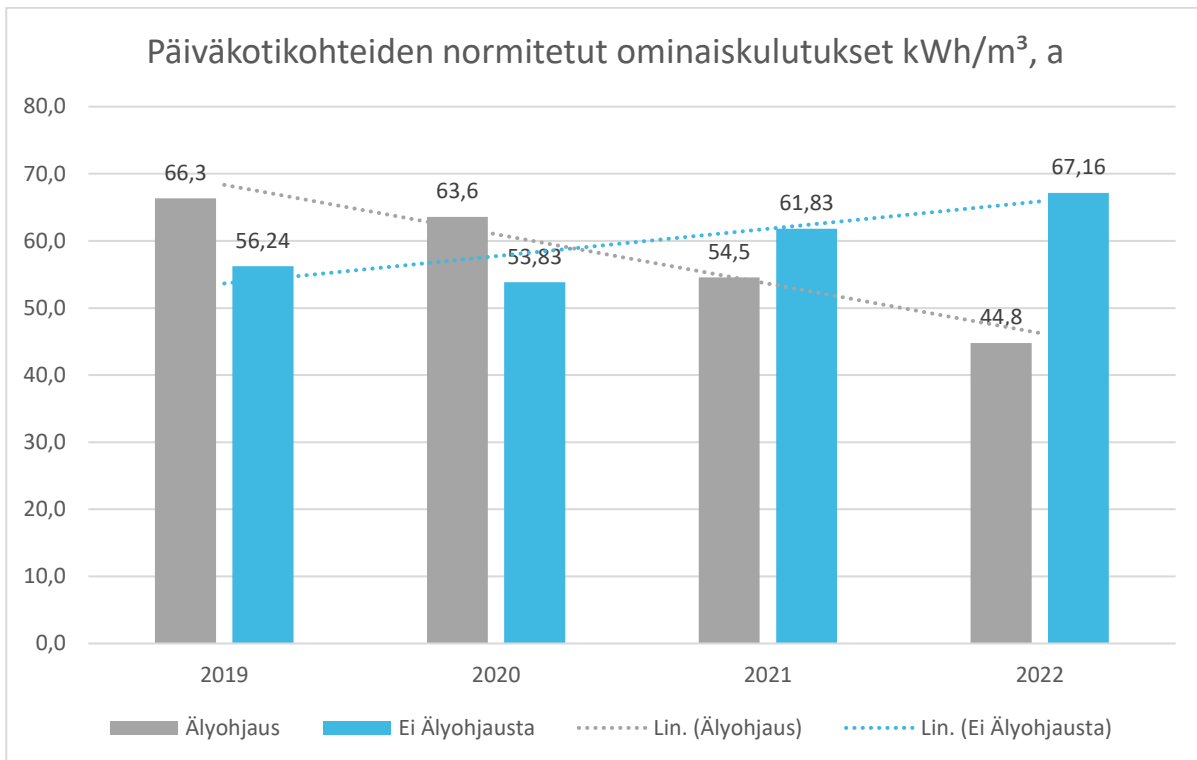
Kuvio 11. Ominaiskulutukset palvelusektorilla 2013 (Ominaiskulutukset palvelusektorilla 2023)

Yleissivistävien oppilaitosten osalta opinnäytetyössä tarkasteltiin yhteensä kuutta hyvin ylläpidettyä ja ennen 2000-lukua rakennettua rakennusta. Kolmessa näistä rakennuksista on käytössä lämmitysjärjestelmien älyohjaus ja kolmessa ei ole ollut kyseinen ohjaus käytössä. Kuvioista 12 voidaan todeta, että älyohjausta on käytetty jo lähtökohtaisesti paremman ominaiskulutuksen omaaviin kohteisiin. Molempien tarkastelukohteiden kohdalla voidaan toki todeta, että rakennukset ovat vuoteen 2022 mennessä saavuttaneet Motivan energiakatselmustietokantaan nähden mediaania alhaisemman normitetun ominaiskulutuksen. Kohteiden, joissa ei ole älyohjausta käytössä, ominaiskulutukset ovat laskeneet 4,5 kWh/m<sup>3</sup>, a vuosien 2019 ja 2022 välillä. Puolestaan älyohjauksen alaisten kohteiden vastaavan aikajakson muutos on ollut 5,7 kWh/m<sup>3</sup>, a, mutta suurempi ero näiden tarkastelukohteiden välillä on tapahtunut vuosien 2021 ja 2022 välillä. Älyohjaus on otettu käyttöön joulukuussa 2021, jonka voidaan olettaa näkyvän laskeneena ominaiskulutuksena vuonna 2022. Muiden oppilaitosten kohdalla ei vastaavaa eroa ole syntynyt, kuten kuvio 12 osoittaa. Kohde 11 osalta marraskuussa 2021 tehdyt ilmanvaihdon käyntiaikojen muutokset ovat huomioitu laskennassa.



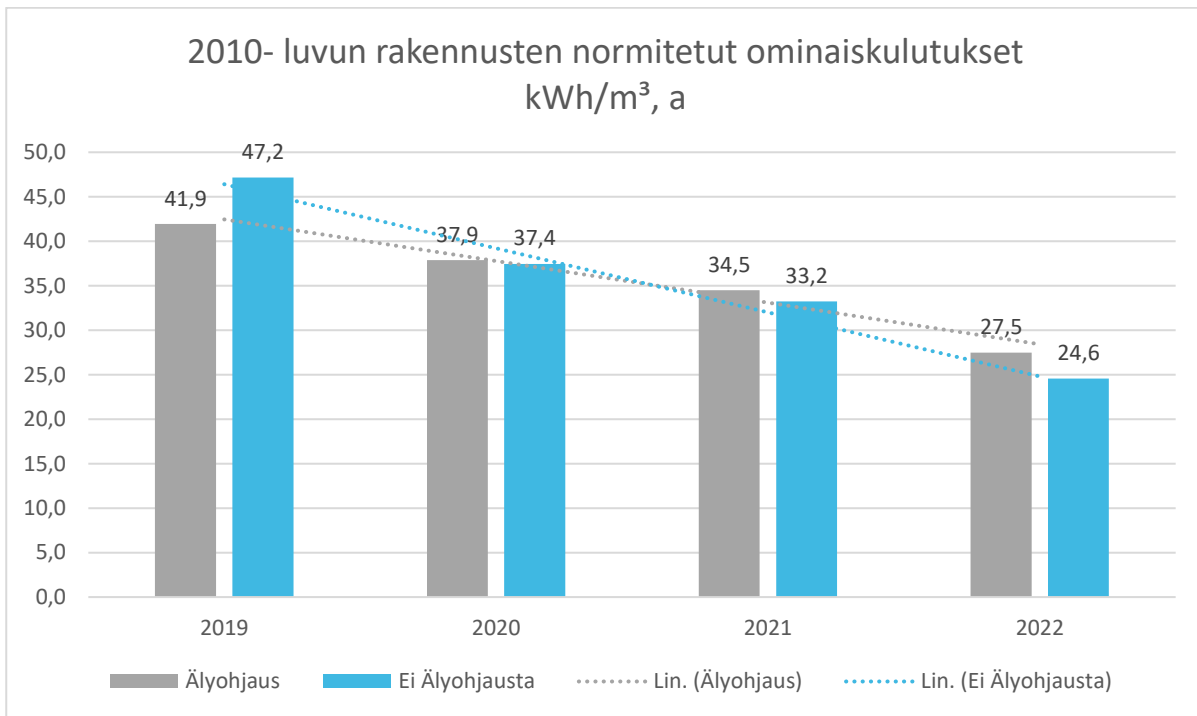
Kuvio 12. Yleissivistävien oppilaitosten ominaiskulutusten muutokset 2019-2022

Lasten päiväkotien osalta normitetut kulutukset ovat pienen tarkastelun tuloksia, sillä tarkasteltavia kohteita oli vain kaksi. Kohteessa 9 älyohjaus on käytössä ja kohteessa 6 kyseisiä järjestelmiä ei ole käytetty vuoteen 2023 mennessä. Kuvio 13 voidaan todeta, että normitetut ominaiskulutukset muuttuvat suuresti molemmissa kohteissa. Kohteiden käyttöasteet eivät ole tarkastelujakson aikana muuttuneet, eikä rakennusten kohdalla ole tehty saneerauksia tai muita energiankulutusta selittäviä toimenpiteitä. Kohteen 9 osalta ominaiskulutuksen lasku osoittautuu lineaarisiksi trendiksi, joten älyohjauksen vaikutusta vuoden 2021 ja 2022 välillä ei ole helppoa osoittaa ominaiskulutuksen avulla. Toisaalta ominaiskulutus on laskenut 9,1 kWh/m<sup>3</sup> vuoden 2020 ja 2021 välillä, joten seuraavan vuoden 9,7 kWh/m<sup>3</sup> kulutuksen vähentymien on prosentuaalisesti aikaisempaa vuotta suurempi.



Kuvio 13. Päiväkotien ominaiskulutusten muutokset 2019-2022

Aiemmista rakennuksista erillisenä tarkasteluna toteutettiin 2010-luvulla valmistuneet rakennukset. Näistä kohteiden 1 ja 2 lämmitysjärjestelmät eivät ohjaudu älyohjauksella. Kohteiden 3, 4 ja 5 vesikiertoiset patteri- ja lattialämmitysjärjestelmät puolestaan säätävät olosuhdeoptimoinnin mukaisesti. Vuonna 2019 valmistuneiden kohteiden 1 ja 2 osalta tulee huomioida ilmanvaihdon käyntiaikojen muutokset, joiden vaikutukset näkyvät etenkin vuosien 2019 ja 2020 välillä. Rakennusten käyttöönoton jälkeen ilmanvaihtoa käytettiin sisäilmastoluokitus 2018 oppaan ja toimeksiantajan oman ohjeistuksen mukaisesti käyttäjän ilmavirroilla vähintään 12 kuukautta käyttöönoton jälkeen (RT 07-11299 2018). Kohde 4:n osalta ilmanvaihdon käyntiaikojen muutosten laskennallinen vaikutus on huomioitu älyohjauksen alaisten kohteiden tuloksissa.



Kuvio 14. 2010- luvun rakennusten ominaiskulutusten muutokset 2019-2022

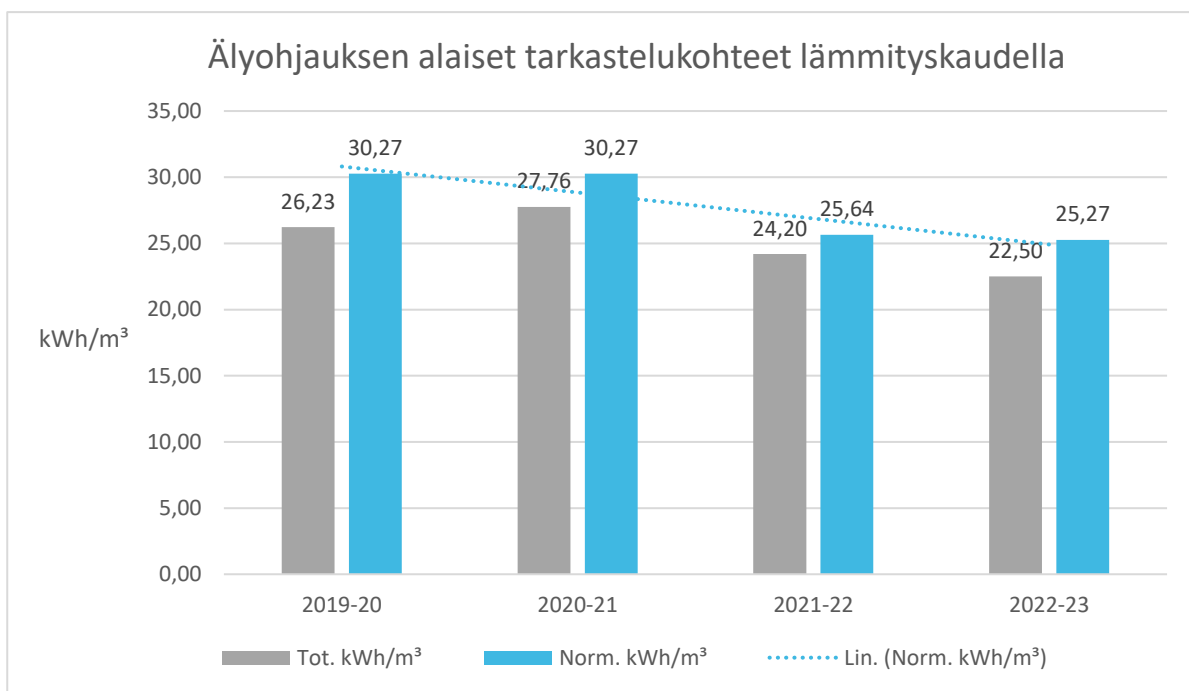
Työssä tarkasteltujen uudempien kohteiden osalta todettiin, että ominaiskulutukset ovat laske-  
neet vuosien 2019 ja 2022 välillä riippumatta siitä, käytettiinkö lämmitysverkostojen ohjauksessa  
älyohjausta. Poikkeuksena ennen 2010-lukua rakennettuihin yleissivistävän oppilaitosten ominais-  
kulutuksiin huomattiin, että 2010- luvun aikana valmistuneissa rakennuksissa olosuhdeoptimoitu-  
jen kohteiden ominaiskulutuksen lasku oli vähäisempää verrattuna muihin tarkastelukohteisiin.  
Kaikki tarkastelussa olleet 2010- luvun kohteet ovat arkkitehtuurillisesti toisiaan vastaavia, joten  
niiden lämmönvarauskapasiteettien ei pitäisi erota toisistaan suuresti.

## 6.4 Lämmityskauden kulutusvaikutukset

Lämmityskauden tarkastelujaksoksi työssä valittiin syys-huhtikuun välinen aikajakso. Perusteena  
tälle on Motivan normituslaskennan ohje, jonka mukaisesti lämmitystarvelukua ei lasketa, jos päi-  
vän keskilämpötila on kevätkaudella yli 10° C ja syyskaudella yli 12° C. (Kulutuksen normitus – Las-  
kentakaavat ja -ohjeet 2023). Ympäristöministeriön asetuksen 1009/2017 mukaisesti sisäilman  
tavoitelämpötila huonelämpötila on vähintään 20° C. Lämmityskaudella tarkoitetaan siis aikaa, jol-  
loin lämmitystä tarvitaan säännöllisesti, jotta tavoiteltu sisälämpötila saavutetaan. Asetuksen  
1009/2017 liitteessä 1 osoitetaan tavoitelämpötilojen saavuttamiseksi ulkolämpötilojen kuukausit-  
taiset keskilämpötilat. Liitteen mukaisesti touko-elokuun keskilämpötilat ovat korkeammat kuin

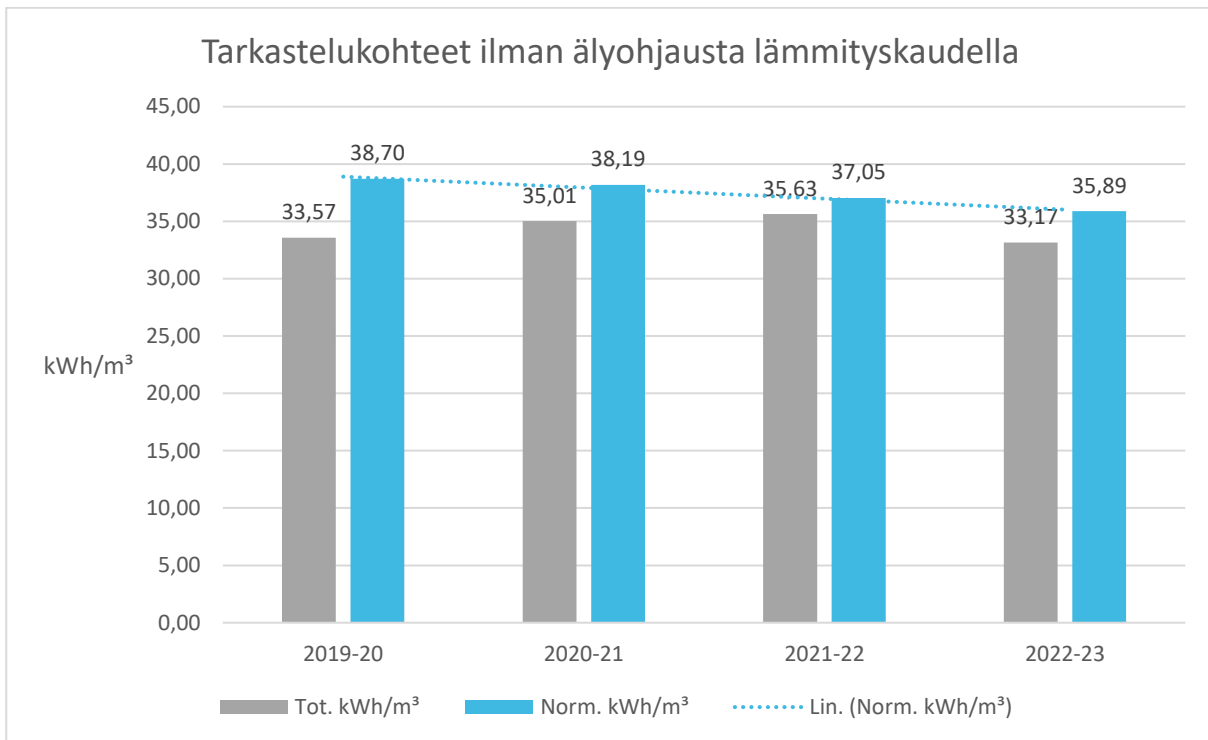
Motivan normituslaskennan ohjeistuksen keskilämpötilat, jonka takia kyseisiä kuukausia ei tässä työssä huomioida osana lämmityskautta. (A 1009/2017.)

Älyohjauksen alaisten lämmitysjärjestelmien osalta tärkeimpänä tavoitteena on ollut sisälämpötilojen optimointi. Samalla tavoiteltiin energian säästöä, joka Älyohjaus 1- ohjelman kohdalla perustuu lämpötilaoptimoinnin ohella käytönaikaiseen ja sääennusteen mukaiseen lämmitysenergian optimointiin (Kallio 2022 & Liite 4). Kuviossa 15 osoitetaan älyohjauksen alaisten kohteiden toteutuneet ja normeeratut ominaiskulutusten muutokset.



Kuvio 15. Älyohjauksen vaikutus lämmityskausien ominaiskulutuksiin [kWh/m<sup>3</sup>]

Älyohjauksen käyttöönotto on tapahtunut vuoden 2021 lopulla, joten ohjelman vaikutusta tarkasteltiin lämmityskausien 2021–22 ja 2022–23 välillä. Sekä toteutunut- ja normeerattuominaiskulutus on vähentynyt näiden vuosien välillä. Toteutuneen ominaiskulutuksen kohdalla lasku on näkyvämpää verrattuna normeerattuun ominaiskulutukseen. Alla olevasta kuviosta (kuvio 16) voidaan puolestaan tarkastella ominaiskulutusten vaihtelua, kun lämmitysjärjestelmien älyohjaus ei ole ollut käytössä.



Kuvio 16. Lämmityskausien ominaiskulutusten [kWh/m<sup>3</sup>] muutokset tarkastelukohteisiin ilman älyohjausta.

Tarkastelussa olleiden ja ilman älyohjausta operoivien rakennusten normeeratut ominaiskulutukset ovat laskeneet lämmityskauden 2021–22 jälkeen. Huomio normeerattujen ominaiskulutusten kohdalla kiinnitty erityisesti siihen, että ominaiskulutus on laskenut tasaisesti lämmityskaudesta 2019–20. Toteutuneiden ominaiskulujen osalta huomattiin suhde lämmityskausien 2019–20 ja 2022–23 välillä, joiden osalta ominaiskulutukset ovat erittäin lähellä toisiaan. Kohdekohtaiset normeeratut ominaiskulutukset eri lämmityskausien välillä on osoitettu kuviossa 17. Kuvio 17 on kuvakaappaus taulukkolaskentatyökalusta, joka on yksi tämän opinnäytetyön tavoitteista.

Kohde	Rakennusvuosi	Älyohjaus ennen vuotta 2022	Kaukolämmön normeerattu ominaiskulutusmuutos vrt. lämmityskausi 2019-2020			Normeerattu ominaiskulutus
			2020-21 kWh/m <sup>3</sup>	2021-22 kWh/m <sup>3</sup>	2022-23 kWh/m <sup>3</sup>	2022-23 vs. 2021-22 kWh/m <sup>3</sup>
Kohde 1	2019	Ei	-6,5	-12,0	-15,3	-3,3
Kohde 2	2019	Ei	-2,4	-13,3	-14,0	-0,7
Kohde 3	2017	Kyllä	-0,4	-17,6	-17,8	-0,2
Kohde 4	2016	Kyllä	-0,7	-5,5	-6,1	-0,6
Kohde 5	2014	Kyllä	-6,1	-8,0	-10,1	-2,1
Kohde 6	1988	Ei	3,2	11,2	13,3	2,1
Kohde 7	1987	Kyllä	0,6	-7,6	-7,3	0,3
Kohde 8	1986	Ei	4,04	6,4	2,1	-4,3
Kohde 9	1981	Kyllä	-3,4	-19,2	-19,7	-0,5
Kohde 10	1957	Ei	-0,8	-1,5	-2,4	-0,9
Kohde 11	1954	Kyllä	2,19	0,1	0,85	0,7
Kohde 12	1924	Kyllä	-0,5	-2,9	-4,2	-1,3
Kohde 13	1924	Ei	-0,3	-0,6	0,57	1,2

Kuvio 17. Kohdekohtaiset normeerattujen ominaiskulutusten muutokset [kWh/m<sup>3</sup>]

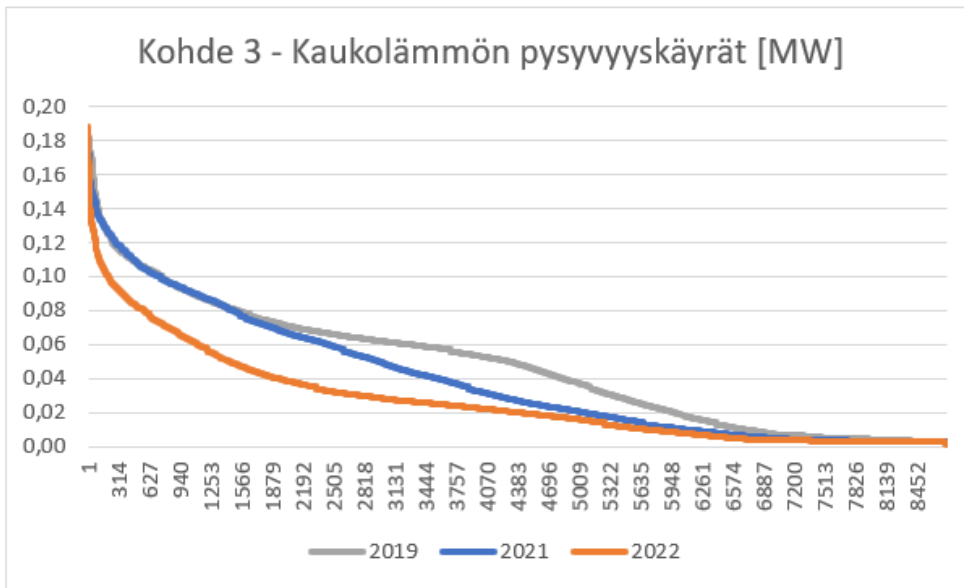
## 6.5 Kaukolämpötehojen arvot ja tarkastelu mahdollisiin muutoksiin

Tarkasteltavien kohteiden kaukolämmönkulutuksesta laadittiin aikasarjat ja pysyvyyskäyrät, joiden avulla lämmitysenergian kulutusta ja mahdollisia muutoksia kyettiin havainnoimaan visuaalisesti. Pysyvyyskäyrä kuvastaa tehontarvetta aikaan suhteutettuna, mikä tämän työn esimerkeissä tarkoittaa lämmitystehon tarvetta tunteina (Kaukolämmön kysynnänjousto 2015). Pysyvyyskäyrästä voidaan havaita, kuinka monta tuntia vuodesta lämmityksen tehontarve on huipussaan ja kuinka tasaisesti tehontarve jakautuu. Aikasarjan avulla puolestaan voidaan osoittaa lämmitystehon todellista vaihtelua, joka myös esitetään ajan funktiona (Pan, Huang & Wang 2013). Työssä on aiemmin esitetty kaukolämpötehon vaikutuksia kaukolämmön kustannuksiin ja kaukolämmön tuotannon päästövaikutuksiin. Kappaleessa 6.6. tarkastellaan tarkemmin, miten huipputehojen muutokset näkyvät lämmityskustannuksissa. Pysyvyyskäyrien osalta työssä tarkasteltiin vuosien 2019, 2021 ja 2022 kulutuksia ja aikasarjojen osalta lämmityskautta 2020–21 ja 2022–23.

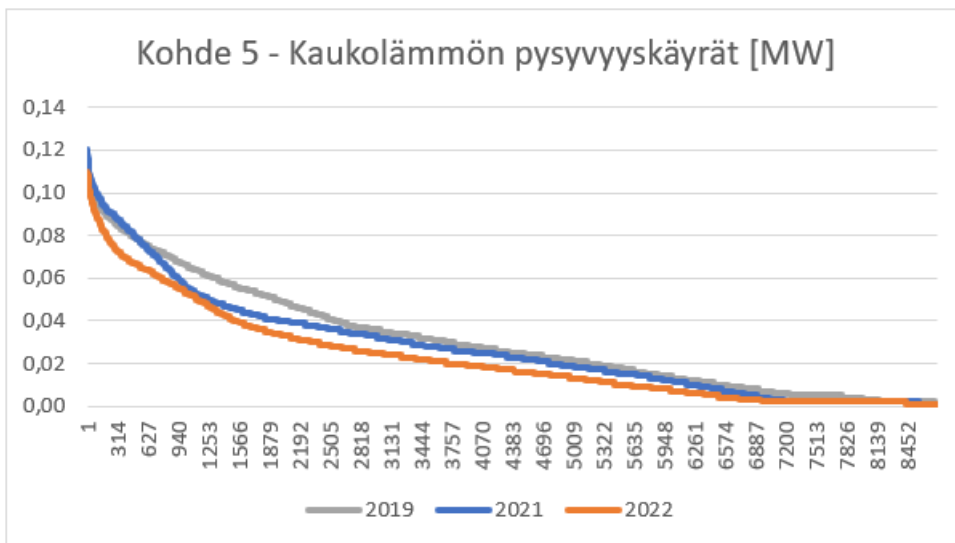
### 6.5.1 2010- luvun rakennukset

Tässä alaluvussa on esimerkkejä 2010- luvun rakennusten pysyvyyskäyrästä ja aikasarjoista. Esimerkkikohteiksi on valikoitunut kohteet, joiden käyttöaste on pysynyt tasaisena tarkasteluvuosien välillä. Kaukolämmön älyohjausta käyttävistä kohteista esimerkkikohteiksi valittiin kohteet 3 ja 5,

ja älyohjauksen ulkopuoliseksi kohteeksi kohde 1. Perusteena kyseisille valinnoille toimi kohteiden lämmintilavuus ja käyttöasteet.



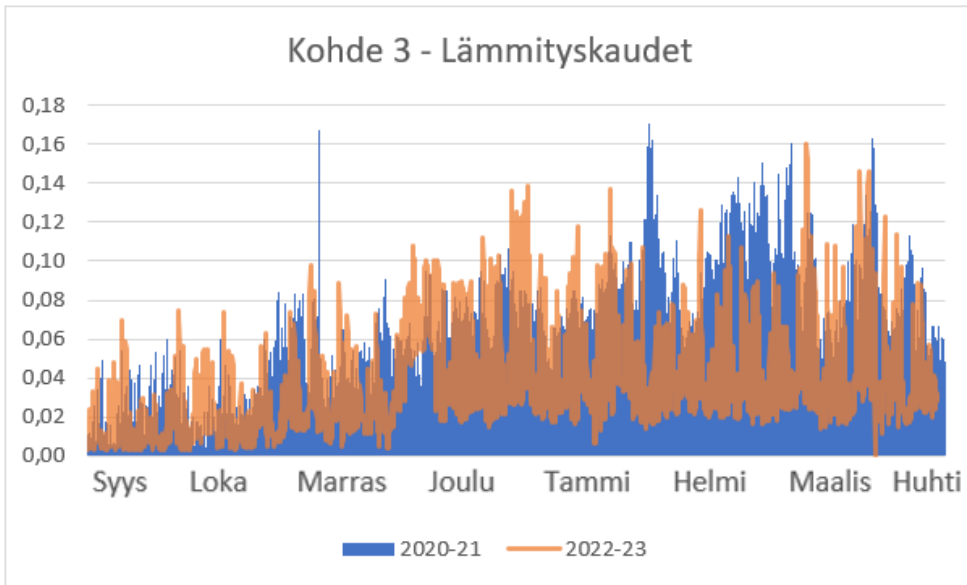
Kuvio 18. Kohde 3 kaukolämmön pysyvyyskäyrä



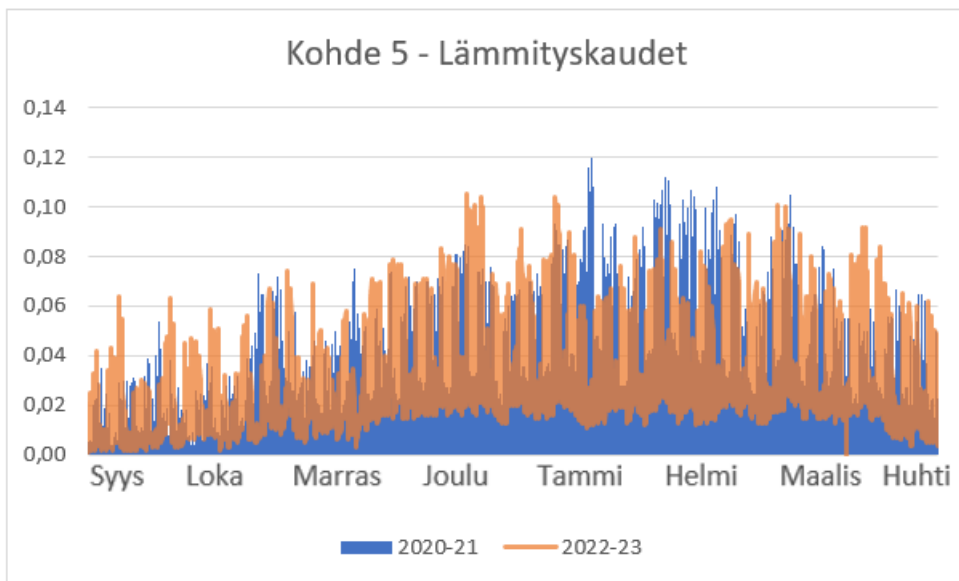
Kuvio 19. Kohde 5 kaukolämmön pysyvyyskäyrä

Kuvioissa 18 ja 19 on nähtävissä 2017 ja 2014 käyttöön otettujen rakennusten kaukolämpötehon pysyvyyttä. Kohteen 3 osalta 2019 vuoden tehon pysyvyyteen on vaikuttanut ilmanvaihdon käyntiajat, jotka ovat muutettu käyttöä vastaaviksi vuoden 2020 aikana. Kyseistä vuotta aiemmin ilmanvaihto on ollut jatkuvasti käytössä mitoitusilmavirran arvoilla. Pysyvyyskäyrän avulla voidaan myös huomata, että vuonna 2022 huipputeho on ollut korkeampi kuin aiempina vuosina, mutta muuten huipputehon tarve ajallisesti on muita vuosia selvästi lyhyempi. Kohteen 5 pysyvyyskäyrä

pysyy aikaisempia vuosia alhaisemmalla teholla, jonka lisäksi kohteen huipputehokin on ollut aiempia vuosia alhaisempi.



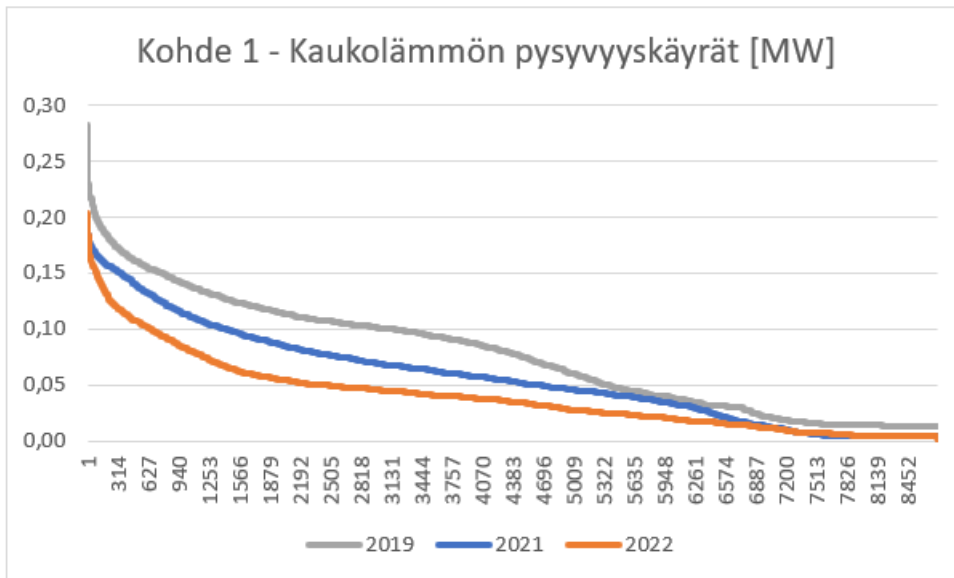
Kuvio 20. Kohde 3 lämmityskauden aikasarja



Kuvio 21. Kohde 5 lämmityskauden aikasarja

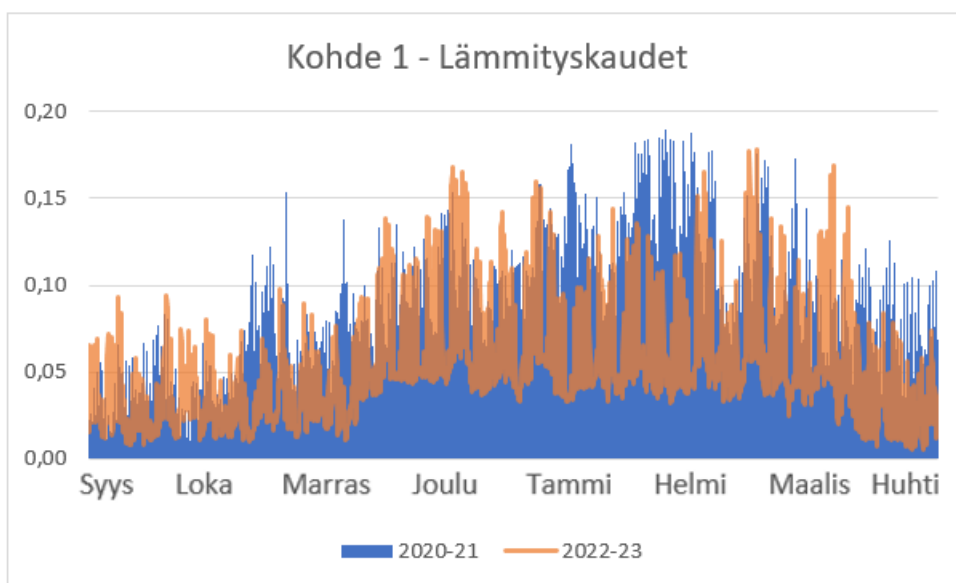
Lämmityskauden aikasarjan perusteella voidaan huomata, että etenkin kohteen 3 kohdalla 2020–21 lämmityskauden tehohiiput ovat yleisempiä verrattuna lämmityskauteen 2022–23, jolloin älyohjaus on ollut käytössä. Aikasarjan perusteella voidaan myös todeta, että tarkasteltavien lämmityskausien ulkolämpötilat ja lämmitystarve on ollut poikkeavia eri kuukausina. Vuonna 2020

joulukuun keskilämpötila Tampereella oli 0,3°C, kun se vuoden 2022 joulukuussa oli -3,8°C. Tammi-kuun keskilämpötilat puolestaan vuonna 2021 oli -5,1°C ja 2,2°C vuonna 2023. Helmikuun osalta vuoden 2021 keskilämpötila oli vuotta 2023 jopa 5° C alhaisempi. (Tilastoja vuodesta 1961 N.d..) Vastaavat huomiot näkyvät molempien kohteiden 3 ja 5 aikasarjoissa.



Kuvio 22. Kohde 1 kaukolämmön pysyvyyskäyrä

Työssä tarkastelluista 2010- luvun kohteista älyohjausta ei käytetty kohteen 1 lämmitysjärjestelmien ohjauksessa. Kuvio 22 osoittaa, että kyseisen kohteen huipputeho on vuonna 2022 ollut vuotta 2021 korkeampi, mutta huipputehon tarve on samaisena vuonna ollut ajallisesti pienempi tarkasteluvuoteen 2021 verrattuna. Vuoden 2019 pysyvyyskäyrään vaikuttaa, että kohde on otettu käyttöön vuonna 2019. Kuten aiemmin mainittu, ensimmäisenä käyttövuonna toteutettu ilmanvaihdon täysiaikainen mitoitusilmavirralla käyttäminen vaikuttaa lämmitystehontarpeeseen. Tämä voidaan havaita vuoden 2019 pysyvyyskäyrää tarkastelemalla. Kohteen osalta tulee myös huomioida, että uudemmissa rakennuksissa lämmitysjärjestelmän automaatio voi jo lähtökohtaisesti madaltaa vesikiertoisten lämmitysverkostojen tehoa korkean käyttöveden lämmitystehotarpeen aikana. 2010- luvun rakennusten patteri- ja lattialämmitysverkostot toimivat vanhempia tarkastelukohteita alhaisemmilla menoveden lämpötiloilla, joka osaltaan madaltavat älyohjattavien lämmityspiirien huipputehovaikutuksia.

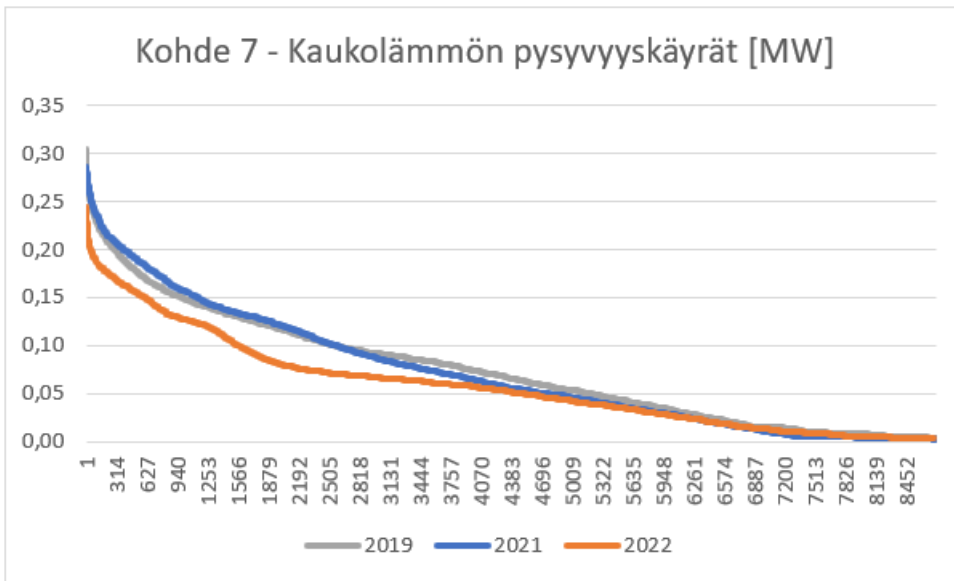


Kuvio 23. Kohde 1 lämmityskausien aikasarja

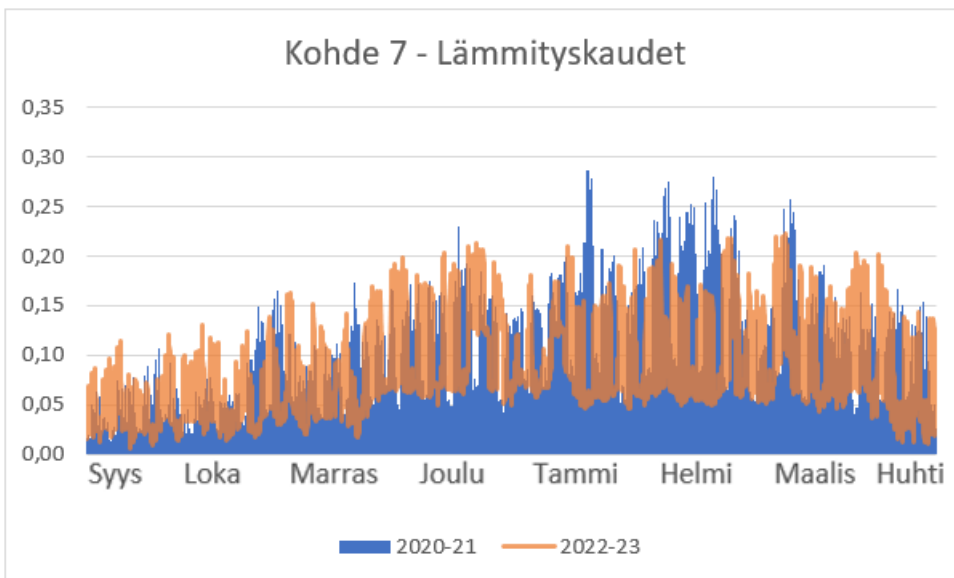
Ilman lämmitysverkoston älyohjausta toimineen kohteen 1 lämmityskausien aikasarjassa on huomattavissa tarkastelukausten lämpötilavaihtelut (Tilastoja vuodesta 1961 N.d.). Kuten kohteissa 3 ja 5, suurimmat kulutukset kohdistuvat joulun-maaliskuulle. Kuvio 23 voidaan todeta, että syksy- ja kevätkaudet ovat tarkastelukautena 2020–21 aiheuttanut suurempia tehuippuja viimeisimpään lämmityskauteen 2022–23 verrattuna. Tämä poikkeaa hieman aiemmista lämmityskausien aikasarjoista (Kuviot 20 & 21). Älyohjauksen alaisissa tarkastelukohteissa 3 ja 5 voitiin puolestaan havaita, että etenkin kevätkauden 2023 kulutus oli lähempänä talvijakson arvoja. Kohteen 1 kohdalla toki on huomattavaa, että kulutuksen trendissä on havaittavissa suurempaa vaihtelua läpi tarkastelujakson, jolloin myös talvikuukausien huipputehot näyttävät piikkimäisempinä.

### 6.5.2 Muut rakennukset

Opinnäytetyössä tarkasteltujen rakennusten osalta lähtökohtaisesti oletettiin, että ennen 2010-lukua valmistuneissa kohteissa älyohjauksen vaikutus lämmitysverkoston toiminnan ohjauksessa olisi näkyvämpää. Tässä alaluvussa on yhdistetty mallikaavioita 1980-, 1950- ja 1920-luvun tarkastelukohteiden tehojen ja pysyvyykäyristä sekä aikasarjoista. Kohde 11 kohdalla tulee huomioida, että rakennuksen ilmanvaihdon käyttöaikoja on muutettu marraskuussa 2021. Nämä vaikutukset näkyvät kulutuskäyriä, koska kaavioita ovat laadittu toteutuneiden kulutusten pohjalta.



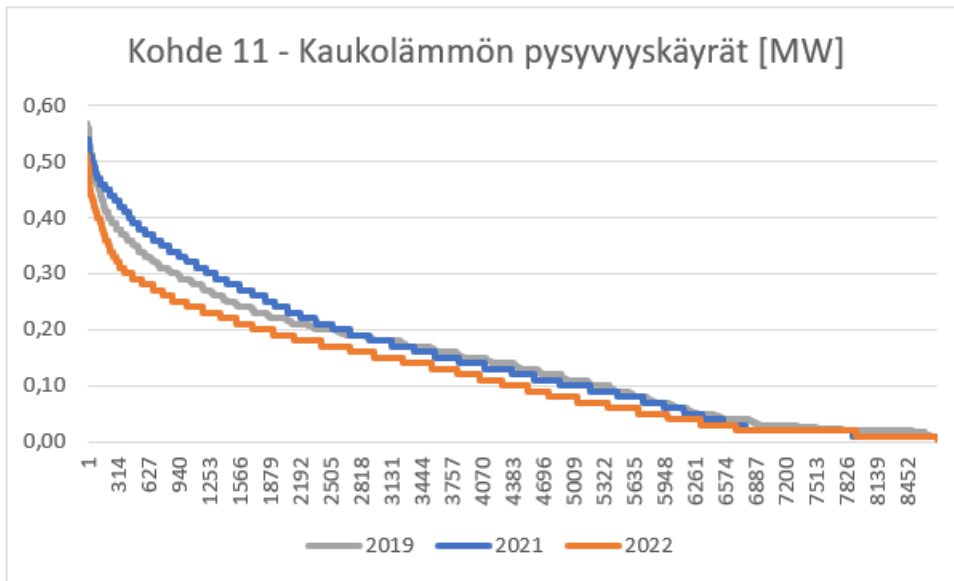
Kuvio 24. Kohde 7 kaukolämmön pysyvyyskäyrä



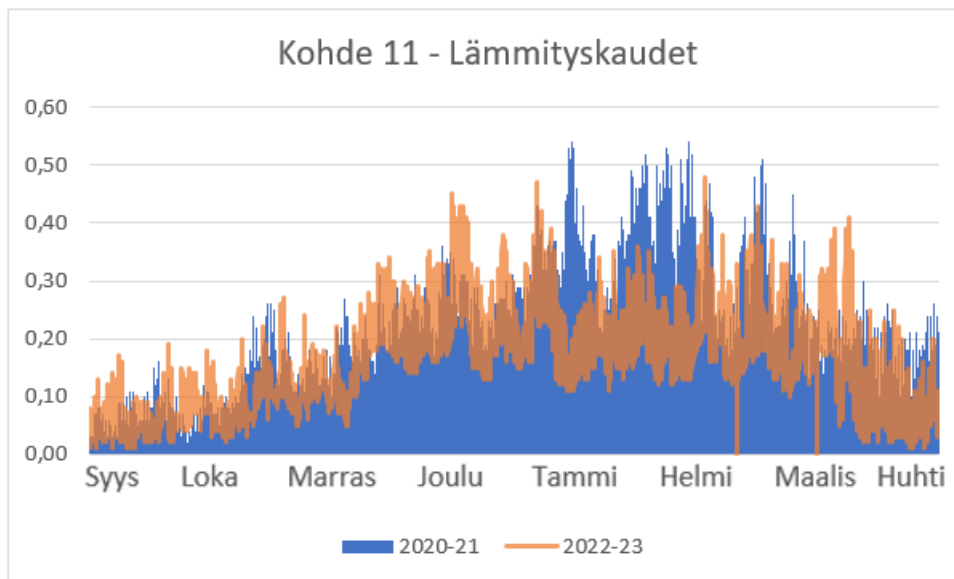
Kuvio 25. Kohde 7 lämmityskausien aikasarja

1980-luvun tarkastelukohteen pysyvyyskäyrät (kuvio 24) osoittavat, että kohteen lämmityksen huipputehot ovat laskeneet vuoden 2019 tehosta. Kuviosta on todettavissa, että vuosi 2022 lämmitystehon tarve on muita vertailuvuosia alhaisempaa noin puolet ajanjaksosta, eli kalenterivuodesta. Huipputehon tarpeen osalta aikajakso on jokaisen vuoden kohdalla lyhyt. Kohteen kaukolämmön huipputeho vuonna 2022 oli 245 kW, joka aikasarjan perusteella on sijoittunut lämmityskaudelle 2021–22. Viimeisimmän lämmityskauden osalta on havaittavissa, että korkea tehotarve on tasaisemmin 150–200 kW välillä (0,15–0,20 MW), kun ennen älyohjauksen käyttöä korkea tehotarve on ollut tätä suurempaa. Aiemmin tässä työssä todetut ilmatieteenlaitoksen

ulkolämpötilojen tilastoidut keskiarvot näkyvät myös tämän kohteen aikasarjassa (Tilastoja vuodesta 1961 N.d.).



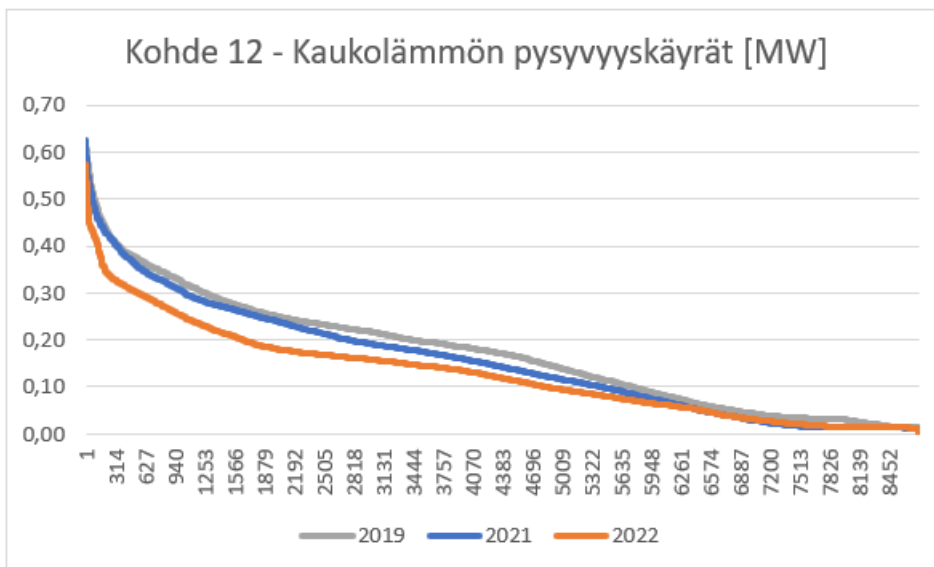
Kuvio 26. Kohde 11 kaukolämmön pysyvyyskäyrä



Kuvio 27. Kohde 11 lämmityskausien aikasarja

Kuviosta 26 nähdään, kuinka 1950-luvulla valmistuneen oppilaitoksen vuoden 2022 lämmityshontarve on muuttunut aikaisempiin verrattuna. Kyseisessä kohteessa on tehty ilmanvaihdon aikajohjelmamuutoksia, jotka näkyvät energiankulutuksessa vuoden 2021 ja 2022 välillä. Muutoksista huolimatta pysyvyyskäyrän trendit ovat hyvinkin toisiaan vastaavia. Poikkeuksena aiempiin tarkastelukohteisiin, kohteen 11 osalta 2021 huipputeho ja korkean lämmitystehon aikajakso on vertai-

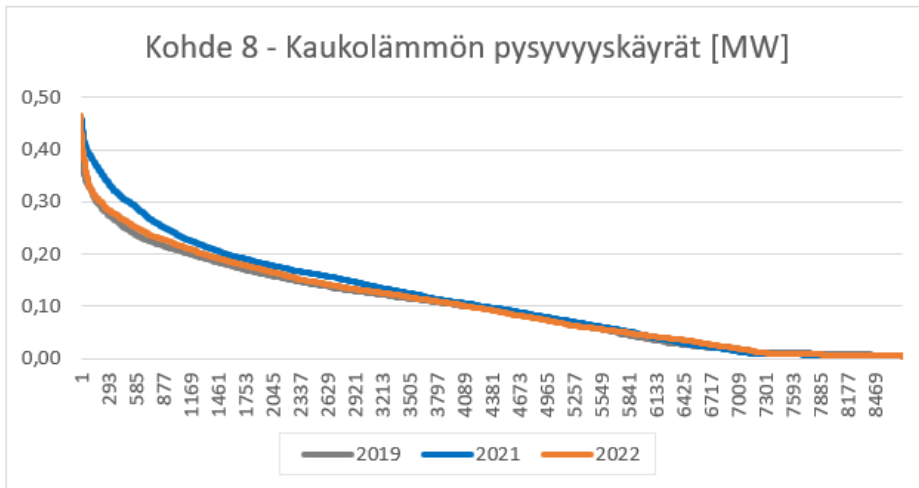
luvuosista suurin. Aikasarjasta (kuvio 27) puolestaan on nähtävissä, että vuoden 2021 kylmä ajanjakso tammi-helmikuun välillä näkyy korkeana kulutuksena. Kyseisen jakson huipputehot ovat noin 50 kW suurempia kuin lämmityskaudella 2022–23 mitatut kylmien aikajaksojen huipputehot. Maaliskuun osalta lämmitystehontarve on viimeisimmällä mitatulla kaudella suuri. Tämä selittyy sillä, että vuoden 2023 maalikuu oli keskiarvolta 2,2°C vuoden 2021 maaliskuuta kylmempi (Tilastoja vuodesta 1961 N.d.).



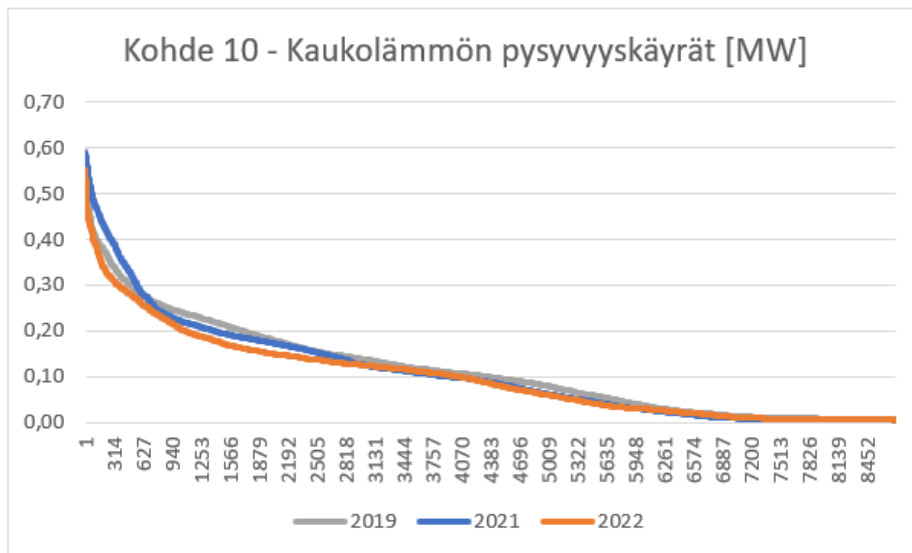
Kuvio 28. Kohde 12 kaukolämmön pysyvyyskäyrä

Lämmitettävän tilavuuden osalta kohde 12 oli tässä työssä tarkastelluista kohteista suurin. Kuvio 28 osoittaa, että kohteen lämmitystehontarve on vuonna 2022 ollut aiempia tarkasteluvuosia alhaisempaa ja toteutunut huipputeho on alhaisempi. Huipputehon tarpeen ajanjakson voidaan myös todeta olevan muita vuosia lyhyempi, vaikkakin se jää kaikkien tarkasteluvuosien osalta lyhyeksi. Näkyvin ero voidaan todeta korkean lämmitystehon tarpeen kohdalla, joka vuonna 2022 osoittautuu olleen 200–330 kW:n välillä. Muina tarkasteluvuosina kyseinen lämmitystehontarve on ollut 250–400 kW:n välillä.

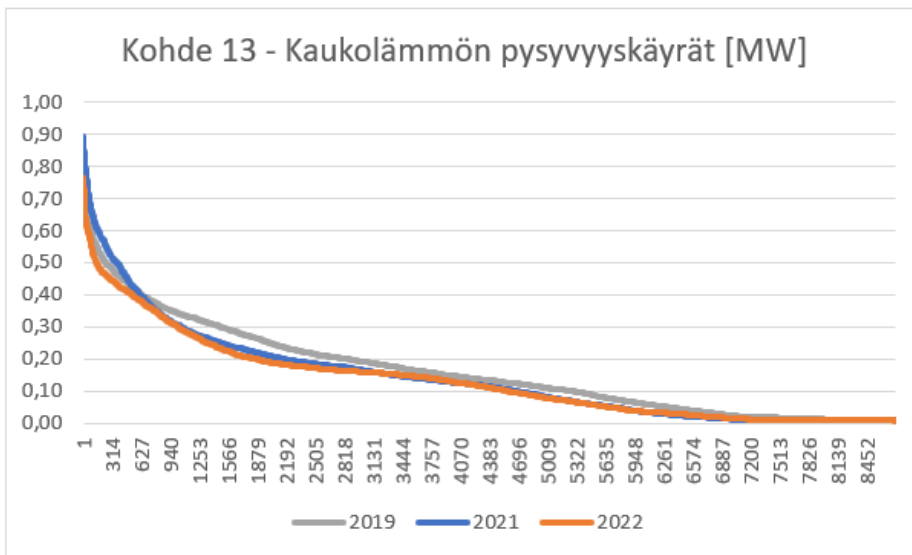
Yllä mainittujen kohteiden vertailuna on käytetty älyohjauksen piiriin kuulumattomia kohteita 8, 10 ja 13. Kyseiset kohteet ovat samoilta vuosikymmeniltä ja rakennustyyppiltään vertailukelpoisia. Aiemmasta esitystyylisestä poiketen, älyohjauksen piiriin kuulumattomat kohteet ja näiden pysyvyyskäyrät ja aikasarjat ovat esitelty kootusti seuraavissa kappaleissa.



Kuvio 29. Kohde 8 kaukolämmön pysyvyyskäyrä

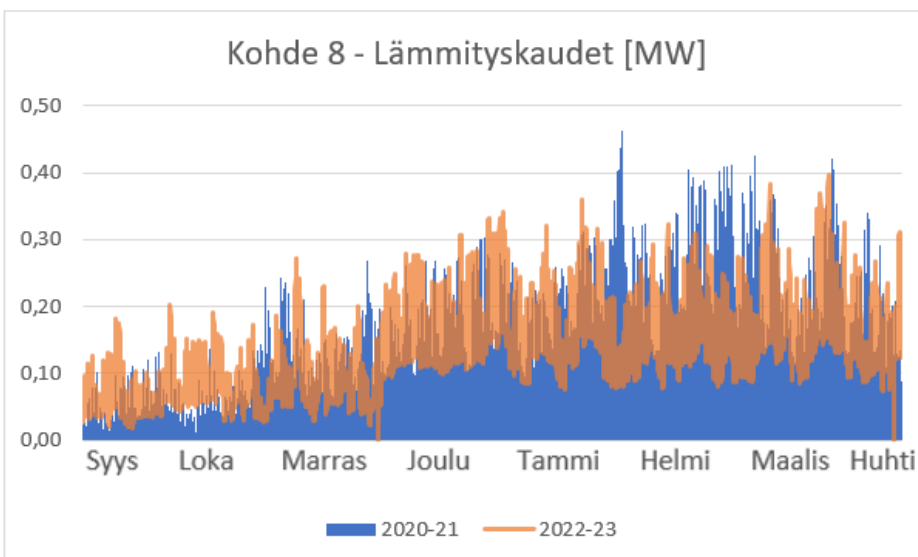


Kuvio 30. Kohde 10 kaukolämmön pysyvyyskäyrä

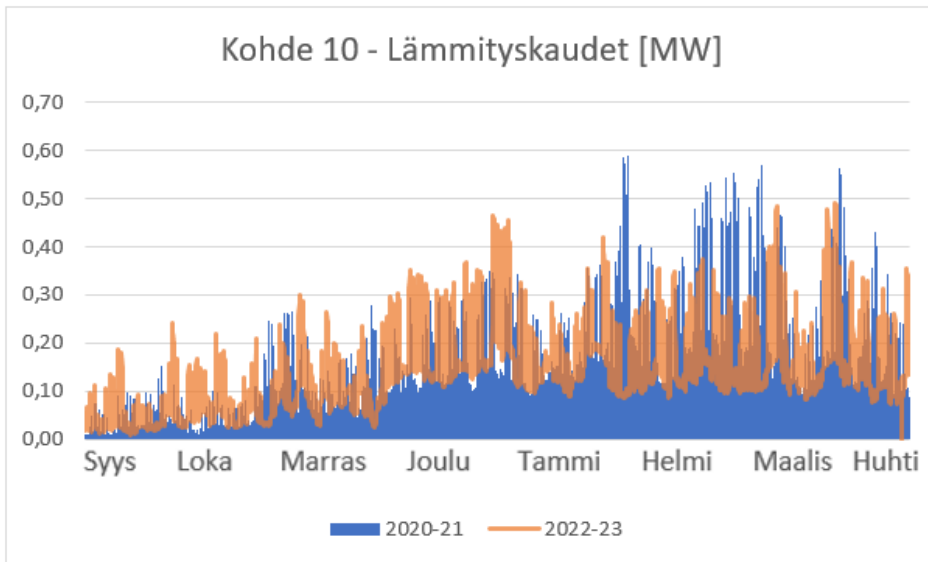


Kuvio 31. Kohde 13 kaukolämmön pysyvyyskäyrä

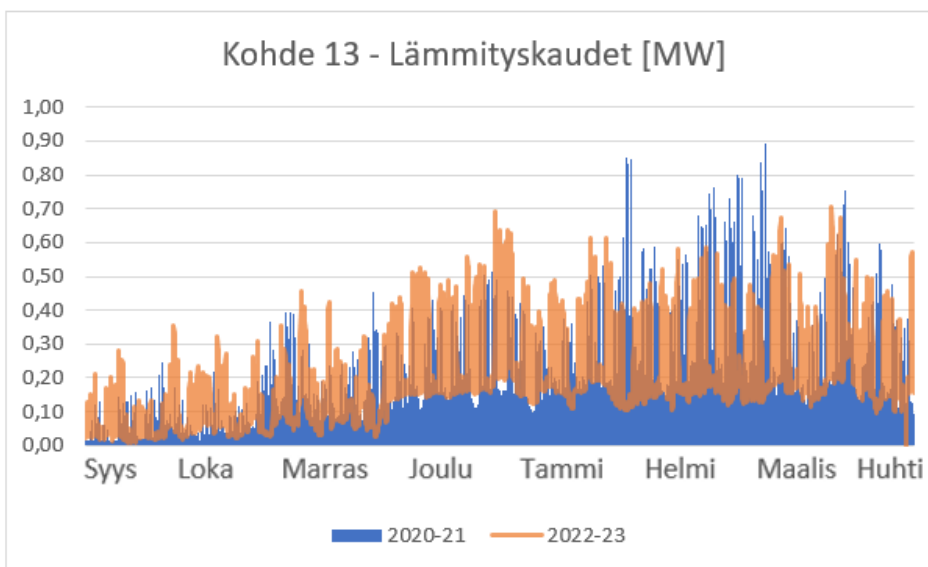
Kuten yllä olevat kuviot osoittavat, tarkastelluissa kohteissa pysyvyyskäyrät vastaavat toisiaan. Pysyvyyskäyrästä voidaan todeta, että vuoden 2022 huipputehot ovat muita vertailuvuosia alempia kohteiden 10 ja 13 osalta, mutta kohde 8 osalta (kuvio 29) huipputeho on ollut alimmillaan vuonna 2019. Kaikkien kohteiden pysyvyyskäyrät vuoden 2021 osalta poikkeavat muista tarkasteluvuosista korkean tehontarpeen osalta, mutta kyseisen poikkeaman aikajakso on lyhyt.



Kuvio 32. Kohde 8 lämmityskausien aikasarja



Kuvio 33. Kohde 10 lämmityskausien aikasarja



Kuvio 34. Kohde 13 lämmityskausien aikasarja

Lämmityskausien aikasarjat näyttävät toisiaan vastaavilta. Älyohjauksen piiriin kuulumaattomien kohteiden osalta voidaan todeta, että lämmityskaudella 2022–23 ei ole havaittavissa suuria yksittäisiä tehopiikkejä. Myöskään pohjatehon osalta ei ole havaittavissa suuria poikkeamia kohteisiin, joiden lämmityksessä hyödynnetään älyohjautuvia lämmitysjärjestelmiä. Aikasarjoissa on toki nähtävissä yksittäisiä 0 MW:n kulutuksia, mutta kyseiset arvot johtuvat mittausdata puutteesta. Vertailujaksojen eroavaisuudet ulkolämpötiloissa näkyvät myös älyohjausta hyödyntämättömien kohteiden lämmitystehoissa.

## 6.6 Vaikutus kaukolämmön päästöihin ja kustannuksiin

Opinnäytetyön alkuvaiheessa on mainittu, miten kaukolämpöliittymän teho vaikuttaa kaukolämmöstä koituviin kokonaiskustannuksiin. Kaukolämpötehon kustannus on kaukolämmön tuottajan määrittämä maksu, joka kasvaa liittymän tehon kasvaessa (Kaukolämmön kysynnänjousto 2015). Toimeksiantajan kohdalla on relevanttia tarkastella paikallisen kaukolämmön tuottajan hinnastoa, jonka takia tehomaksujen vaikutusta tässä työssä on analysoitu Tampereen Sähkölaitoksen vuoden 2022 yrityshinnaston pohjalta. Sähkölaitoksen lähilämmön yrityshinnaston tehomaksu määritetään liittymisvaiheen sopimusvesivirran tai tuntimittaustietoihin perustuvan laskutusvesivirran mukaisesti (Lähilämpö myyntihinnasto 2022). Tässä työssä tehomaksujen vaikutuksen arviointi on laskettu toteutuneen vesivirran m<sup>3</sup>/h mukaisesti (kuutiometriä tunnissa). Jotta toteutuneista tuntitehoista on saatu vesivirran arvo, on laskenta suoritettu alla olevalla kaavalla (Rakennusten kaukolämmitys 2021).

$$q = \frac{Q * 3600}{Cp * \rho * (90^{\circ} - 33^{\circ})}$$

Kaavan symbolit ja arvot kuvastavat seuraavia tekijöitä ja arvoja;

- q = toteutunut vesivirta m<sup>3</sup>/h
- Q = toteutunut tuntiteho kilowatteina (kW), joka on saatu kulutusseurannasta
- Cp = veden ominaislämpökapasiteetti 4,192 kJ/(kg \* °C)
- ρ = veden tiheys 976 kg/m<sup>3</sup>
- 90°-33° = kaukolämmön ensiöpuolen tulo- ja paluuvesien mitoituslämpötilat
- 3600 = yksikkömuunnoskerroin, jotta vesivirta saadaan muodosta m<sup>3</sup>/s muotoon m<sup>3</sup>/h

Tampereen Sähkölaitoksen asiakkaiden kohdalla tehomaksun vaikutus näkyy vasta seuraavan vuoden kustannuksissa. Näin ollen toteutuneen tehohuipun alentuminen ei näy välittömästi kaukolämmön kustannuksissa, vaan uusi päivitetty vesivirran mukainen tehomaksu astuu voimaan automaattisesti uuden laskutusvuoden alussa. Tässä opinnäytetyössä on keskitytty älyjärjestelmien teoreettisiin säästöpotentiaaleihin, joten kaukolämmön kustannuksia laskettaessa tehomaksun hinta on kohdistettu kyseiselle tarkasteluvuodelle. Toteutunut maksimivesivirta ei myöskään ole aina peruste uudelle tehomaksulle, koska maksimivesivirtaa laskettaessa Tampereen Sähkölaitos määrittää laskutusvesivirran lineaarisen regression ja mitoitusulkolämpötilan -29°C perusteella.

(Laskutusvesivirta asiakkaan laskutuksen perusteena N.d..) Näiden tekijöiden perusteella opinnäytetyössä keskityttiin tarkastelemaan kohdekohtaisesti, onko tehohiiput laskeneet aikaisempiin vuosiin verrattuna.

Kohde	Rakennusvuosi	Älyohjaus ennen vuotta 2022	Normeeratun kulutuksen mukainen päästömuutos		Tehohiiput laskeneet	
			2022 vs. 2019	2022 vs. 2021	2022 vs 2019	2022 vs 2021
Kohde 1	2019	Ei	-49 %	-26 %	Kyllä	Ei
Kohde 2	2019	Ei	-47 %	-26 %	Ei	Ei
Kohde 3	2017	Kyllä	-43 %	-27 %	Ei	Ei
Kohde 4	2016	Kyllä	-30 %	-20 %	Ei	Kyllä
Kohde 5	2014	Kyllä	-28 %	-13 %	Kyllä	Kyllä
Kohde 6	1988	Ei	19 %	9 %	Ei	Kyllä
Kohde 7	1987	Kyllä	-22 %	-14 %	Kyllä	Kyllä
Kohde 8	1986	Ei	3 %	-2 %	Ei	Ei
Kohde 9	1981	Kyllä	-32 %	-18 %	Kyllä	Kyllä
Kohde 10	1957	Ei	-13 %	-2 %	Kyllä	Kyllä
Kohde 11	1954	Kyllä	-6 %	-2 %	Kyllä	Kyllä
Kohde 12	1924	Kyllä	-26 %	-12 %	Kyllä	Kyllä
Kohde 13	1924	Ei	-17 %	1 %	Kyllä	Kyllä

### Kuvio 35. Normeeratun kulutuksen mukaiset päästövaikutukset ja tehohiippujen muutokset

Yllä olevassa kuviossa on esitetty älyohjauksen alaisten kohteiden ja kyseistä ohjausta hyödyntämättömien kohteiden tehohiippujen muutokset. Vertailussa on tarkasteltu muutosta kahden viimeisen täyden kalenterivuoden kohdalla, jonka lisäksi tehohiippuja on verrattu vuoteen 2019. Tuloksista voitiin todeta, että olosuhdeoptimointia käyttävien rakennusten kohdalla tehohiiput laskivat kaikissa kohteissa yhtä 2010-luvun rakennusta lukuun ottamatta. Tehohiippujen kohdalla 2010-luvun rakennuksissa näkyi tehohiippujen alenemista selvästi vähemmän vanhempiin rakennuksiin verrattuna. Kyseinen ilmiö oli odotettavissa, koska 2010-luvun kohteissa tuloilman lämmityksen tehontarve on merkittävä, jonka ohella rakennuksissa on vesikiertoinen lattialämmitys (Suomäki & Vepsäläinen 2013, 86). Lattialämmitys toimii patteriverkosta alhaisemmillä menoveden lämpötiloilla, joten vaikutus hiipputehoihin jää vähäisemmäksi. Älyohjauksen alaisissa vanhemmissa tarkastelukohteissa patteriverkosto toimii tuloilman myötä tapahtuvan lämmityksen tukena ja kyseisten tarkastelukohteiden kaukolämmön tehohiiput olivat laskeneet.

Normeeratun kulutuksen mukaiset vaikutukset kaukolämmityksestä koituneisiin päästöihin näkyy kuviossa 35. Jotta päästöt olisivat vertailukelpoisia, on laskuissa käytetty vuoden 2022 päästökerrointa. Tampereen Sähkölaitos on ilmoittanut vuonna 2022 myydyn kaukolämmön CO<sub>2</sub>-päästöjen pitkänajan keskiarvoksi 154 g/kWh (Sähkön ja lämmön alkuperätiedot N.d.). Kyseinen ominaispäästökerroin poikkeaa hieman tilastokeskuksen julkaiseman vuosien 2019–2021 keskiarvosta 158 gCO<sub>2</sub>/kWh. Kaukolämmön ominaispäästöt ovat laskeneet viimeisten vuosien aikana, joten kaukolämmön kulutuksen ollessa tasaista, myös päästöt ovat tämän myötä laskeneet. (CO<sub>2</sub>-päästökertoimet 2023.) Kuvion 35 päästömuutokset osoittavat, että yhteisellä päästökertoimella ja normeeratulla lämpöenergian kulutuksella verrattuna älyohjauksen alaisten kohteiden päästöt ovat vähentyneet. Tarkastelukohteiden osalta voidaan myös todeta, että olosuhdeoptimoinnin ulkopuolisista kohteista päästöt ovat nousseet kohteen 6 osalta. Tämän lisäksi kohde 13 normeeratun kulutuksen mukaiset päästöt ovat nousseet yhdellä prosentilla, mutta todellisuudessa päästöt ovat laskeneet kaukolämmön ominaispäästöjen myötä.

Kohde	Rakennusvuosi	Älyohjaus ennen vuotta 2022	Säästyneet energiakustannukset - palvelumaksut	
			Hyötyä 2022 vs. 2019-21 keskiarvo	Hyötyä 2022 vs 2021
Kohde 1	2019	Ei		
Kohde 2	2019	Ei		
Kohde 3	2017	Kyllä	Kyllä	Kyllä
Kohde 4	2016	Kyllä	Kyllä	Kyllä
Kohde 5	2014	Kyllä	Kyllä	Kyllä
Kohde 6	1988	Ei		
Kohde 7	1987	Kyllä	Kyllä	Kyllä
kohde 8	1986	Ei		
Kohde 9	1981	Kyllä	Kyllä	Kyllä
Kohde 10	1957	Ei		
Kohde 11	1954	Kyllä	Ei	Kyllä
Kohde 12	1924	Kyllä	Kyllä	Kyllä
Kohde 13	1924	Ei		

Kuvio 36. Älyohjauksen mahdollistamat kustannussäästöt

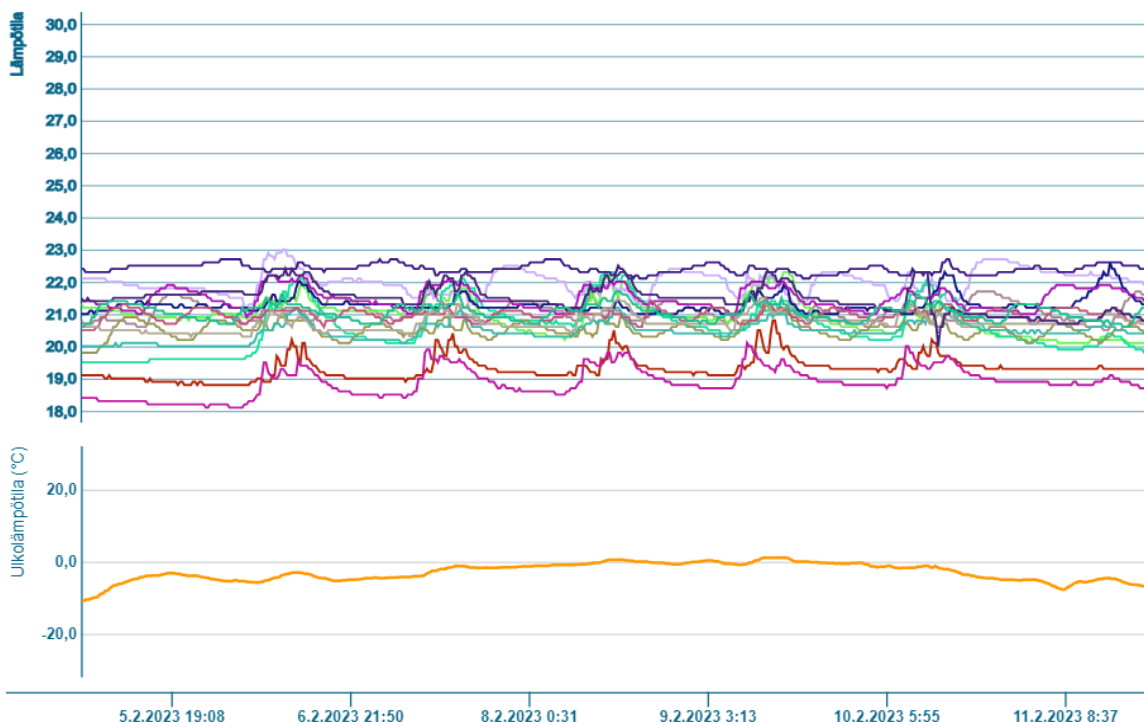
Toimeksiantajan toimesta kustannusten esittämisessä päädyttiin siihen, että opinnäytetyössä taloudellinen hyöty esitetään ”kyllä tai ei”- periaatteella. Kuviossa 36 osoitetaan kohdekohtaisesta älyohjaus 1- talotekniikkaohjauksen vaikutus kohteiden energiakuluihin. Kustannuksiin on vaikuttaneet palveluntarjoajan kuukausimaksut, ylläpidon ja liittymien rajapintamaksut sekä tarvittavien huonelämpötila-anturien ja lämmitysverkostoon liitettyjen anturien kuukausimaksut. Liite 1, joka löytyy tämän työn liiteosiosta, osoittaa kohteissa käytettyjen antureiden määrän. Tietyissä kohteissa anturimaksuja ei aiheudu, jos kohteessa on valmiina hyödynnettäviä lämpötila-antureita.

Säästöjä on verrattu kahden viimeisen täyden kalenterivuoden välillä, joista 2022 on ensimmäinen vuosi, kun älyohjaus 1 on ollut käytössä kokonaisen vuoden ajan. Tämän lisäksi vertailu toteutettiin viimeisen kolmen vuoden keskiarvoon verraten, jotta vertailunäkökulmaa saatiin laajemmasta näkökulmasta. Yhteenvetona voidaan todeta, että olosuhdeoptimoinnilla on saavutettu kustannussäästöjä. Tästä poikkeuksena on kohde 11, jossa mitta-antureita on huomattavasti muita koh-

teita enemmän käytössä ja rakennuksessa ohjataan kahta eri patteriverkostoa. Kohteen 11 vuosien 2019–21 keskiarvossa tulee myös huomioida, että ilmanvaihdon aikamuutosten vaikutus perustuu laskennalliseen arvioon, joka on vähennetty muutosta edeltävien vuosien kulutuksista.

## 6.7 Sisälämpötilojen pysyminen tavoitearvoissa

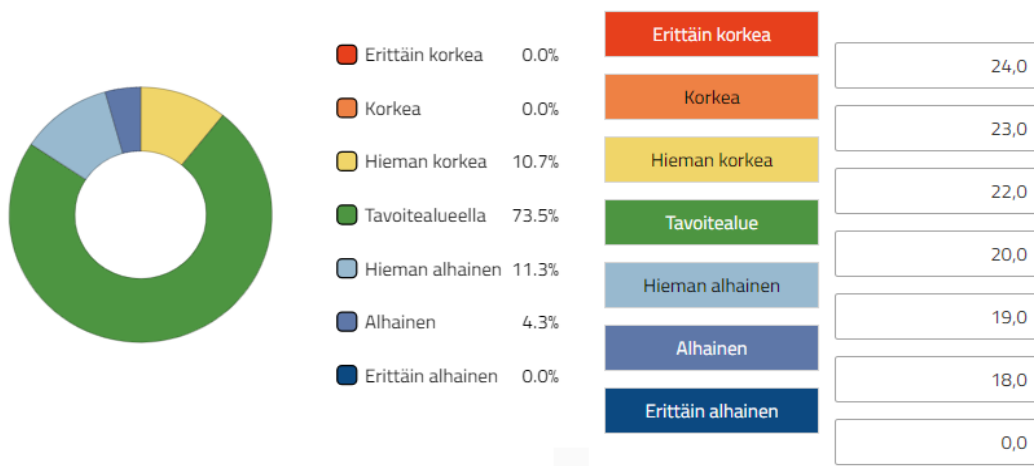
Opinnäytetyössä tarkasteltujen kohteiden osalta tavoitteelliset sisälämpötilat ovat hyvää sisäilmastoa tavoittelevia. S2- luokituksen saavuttamiseksi operatiivisten sisälämpötilojen tulee opetus- käytön tiloissa pysyä 20°C –27°C välillä 90 % ajasta. (RT 07-11299 2018, 6.) Tarkastelukohteiden käyttäjiltä ei ole saatu negatiivista palautetta sisäilmaolosuhteiden osalta, joten työn laajuuden rajaamiseksi tässä työssä ei esitellä jokaista kohdetta yksitellen. Työssä pyritään osoittamaan valikoitujen ja havainnollistavien esimerkkien avulla, millaiset lämpötiladatat tarkastelukohteista on saatu mittausten perusteella. Seuraavissa kappaleissa ja kuvioissa osoitetaan, millaisia lämpötiloja kohteissa on vallinnut lämmityskaudella 2022–23 sekä osoitetaan niiden vaikutuksia lämmitysjärjestelmien ohjaukseen.



Kuvio 37. Kohde 5 sisälämpötilojen pysyvyys (Älyohjaus 1)

Kuvion 37 avulla voidaan tarkastella kohde 5:n sisälämpötiloja vuoden 2023 helmikuuiselta viikolta. Kyseisessä kohteessa älyohjauksella on ohjattu vesikiertoista lattialämmitystä, mutta pääasiallinen

lämmitys on toteutettu ilmanvaihdon avulla. Ulkolämpötilat ovat tarkastelujakson aikana vaihdelleet yli kymmenellä lämpötila-asteella, ja sisälämpötilat osassa rakennusta ovat alhaisimmillaan laskeneet noin 18°C tasolle. Kuvion 37 perusteella huonelämpötilat ovat pääasiassa säilyneet sisäilmastoluokan S2 tasolla. Tästä poikkeuksena on kaksi mittauspistettä, joissa lämpötilat ovat lähes pysyvästi alle 20°C alapuolella. Rakennuksen keskilämpötilan voidaan silti todeta pysyneen hyvän sisäilmaston luokassa. Rakennuksen lämpötilojen pysyvyyttä voidaan myös tarkastella alla olevan kuvion 38 tavoin.



Kuvio 38. Kohde 5 sisälämpötilojen pysyvyys (Älyohjaus 1)

Kuvio 38 osoittaa sisälämpötilojen pysyvyyttä eri tavoitetasoilla tarkastelukohteessa 5. Kuviosta 38 voidaan kuvion 37 tavoin todeta, että sisälämpötilat tiettyjen osa-alueiden osalta laskevat alle 20°C ja ovat koko rakennuksen kohdalla keskilämpötila laskee alle S2 sisäilmastoluokan tavoitetason reilu 15 % ajasta. Tässä tulee toki huomioida, että keskilämpötila on käyttöaikojen ulkopuolella alhaisimmillaan. Sisälämpötilojen keskilämpötilan nousu voidaan huomata kuvion 37 trendikäyrästä, jossa on nähtävissä lämpötilojen nousua aina rakennuksen käyttöaikoina.



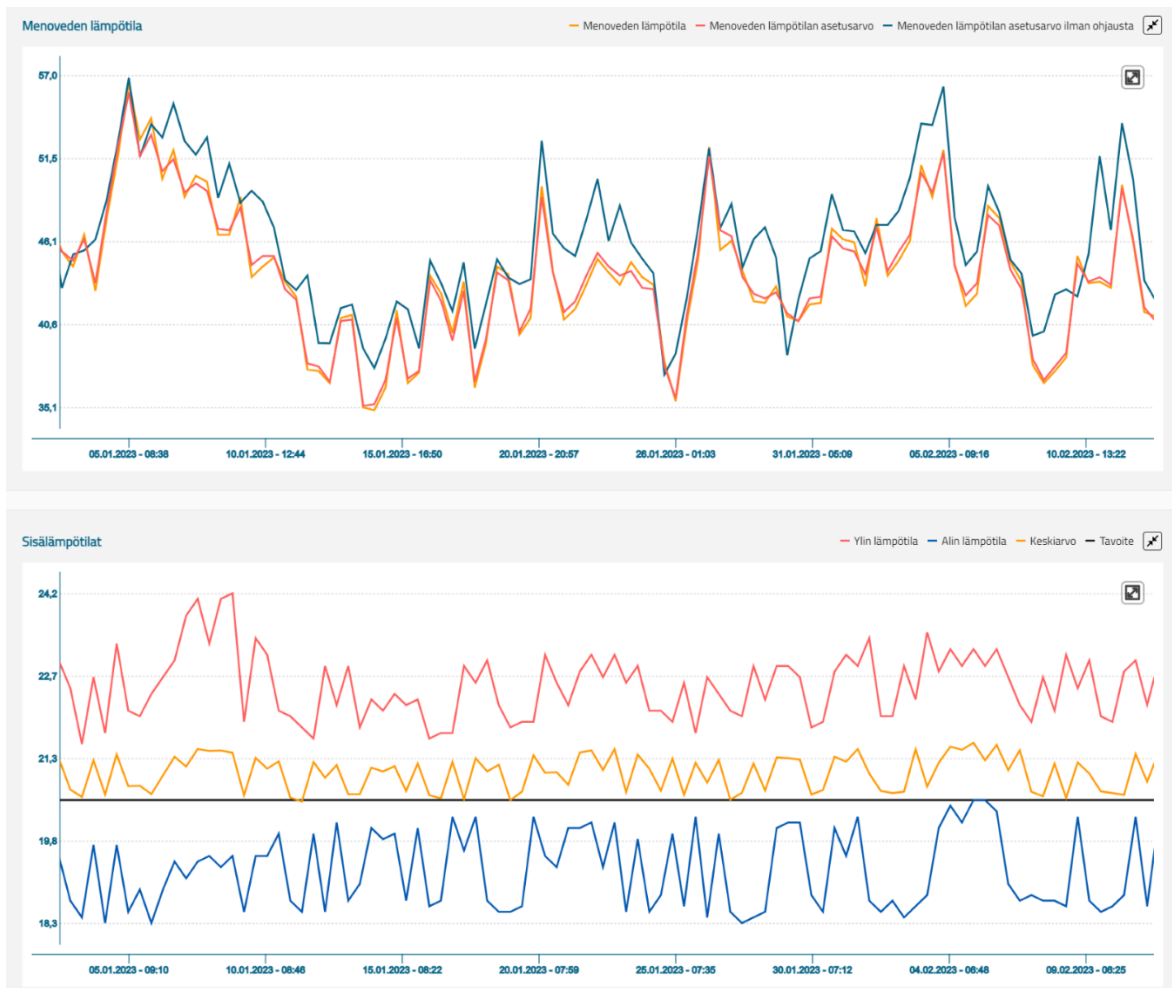
Kuvio 39. Kohde 11 lämmityskauden minimi-, maksimi- ja keskilämpötilan trendi (Älyohjaus 1)

Kuviossa 39 osoitetaan aiempia kuvioita yksinkertaisemmin kohteen 11 lämpötiloja lämmityskauden ajalta. Kuvio osoittaa ainoastaan rakennuksen keskilämpötilan ja tavoitearvon lisäksi toteutuneet ylimmät ja alimmat sisälämpötilat. Kyseessä on tarkastelluista kohteista tilavuudeltaan toiseksi suurin vuonna 1954 rakennettu koulurakennus, jonka tavoitelämpötilaksi on asetettu 20°C. Tavoitelämpötilana on käytetty S2 sisäilmastoluokan alinta lämpötilaa, koska rakennusten käytön aikainen lämpökuorma on runsaan käyttäjämäärän myötä suuri. Kuten kuvio 39 osoittaa, lämpötilat eivät ole ylittäneet missään rakennuksen osassa yli 27°C arvoa, mutta alimmillaan tilastoidut lämpötilat ovat olleet alle 20°C. Kolmen nolla-arvon kohdalla voidaan olettaa kyseessä olevan hetkellinen yhteys- tai anturiongelma. Kuvio 39 näyttää, että rakennuksen keskilämpötila on pysynyt lähellä tavoitelämpötilaa. Lukuisten huonelämpötila-antureiden käytön myötä kohde 11 osoittautui tarkastelujakson ainoaksi kohteeksi, jossa saavutetut säästöt eivät ylittäneet järjestelmän käytöstä koituvia kuluja.



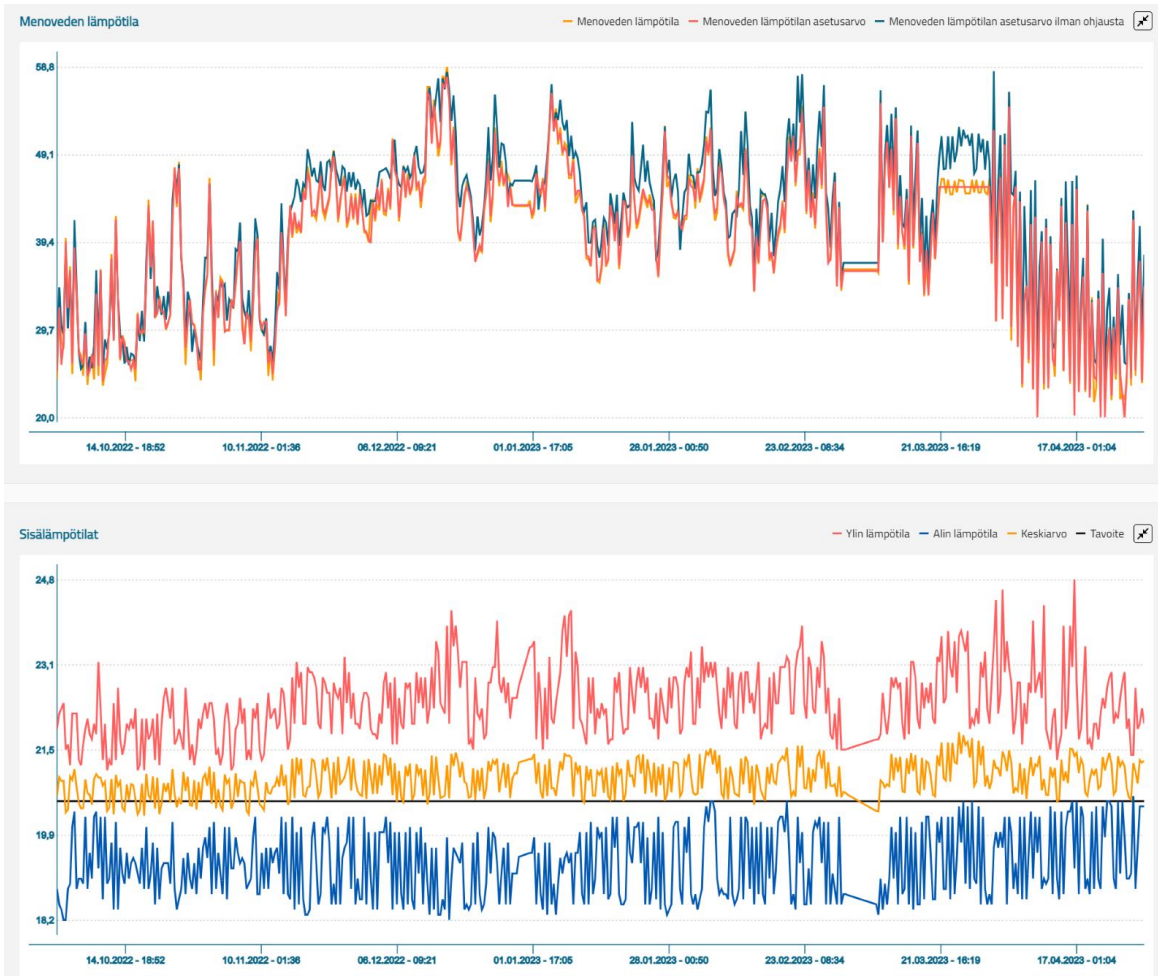
Kuvio 40. Kohde 11 patteriverkoston menolämpötilan kompensointi ja menoveden lämpötila (Älyohjaus 1)

Yllä esitetyn kuvion 40 avulla voidaan puolestaan havainnoida kohteen 11 patteriverkoston menoveden lämpötilan vaihtelua lämmityskauden 2022–23 aikana. Kyseisten trendikäyrien avulla voidaan huomata, miten älyohjaus 1 vaikuttaa patteriverkoston menoveden lämpötilojen ohjaukseen. Kuvion 40 perusteella voidaan havainnoida, kuinka älyohjaus ohjaa menoveden lämpötilaa tavallista asetusarvoa alemmaksi tai korkeammaksi suuntaussiirron tavoin. Menoveden lämpötilojen runsaan vaihtelun kohdalla on myös mahdollista, että patteriverkosto ei ole täysin tasapainossa tai säätöventtiilien toiminta olisi syytä tarkistaa (Suomäki & Vepsäläinen 2013, 128). Menoveden lämpötilan asetusarvojen runsaat vaihtelut lyhyen ajan sisään etenkin kevätaikana voivat johtua lämpökuormien vaikutuksesta sekä ulkolämpötilojen noususta päiväaikaan. Älyohjaus 1 toimittaja on kertonut, että lämmitysjärjestelmien ohjauksessa huomioidaan alueellinen sääennuste, joka huomioidaan lämmitystarpeen kohdalla (Liite 4 2023). Tähän pohjaten voidaan arvioida ohjauksen toimivuutta vai johtuuko suuret menoveden lämpötilan vaihtelut verkoston tasapainosta.



Kuvio 41. Kohde 4 patteriverkoston menoveden lämpötilat ja sisälämpötilat (Älyohjaus 1)

Kuvio 41 kuvaa kohteen 4 patteriverkoston menoveden lämpötiloja sekä rakennuksen sisälämpötiloja. Menolämpötilan alentamisesta huolimatta voidaan huomata, että kohteen 4 keskilämpötila on pysynyt yli tavoitearvo koko viiden viikon mittaisen tarkastelujakson ajan. Alemman menolämpötilan myötä on täten onnistuttu säästämään patteriverkoston lämmitysenergian kohdalla. Tämän lisäksi kuviosta voidaan melko varmaksi todeta, että S2 sisäilmastoluokan vaatimukset ovat saavutettu keskilämpötilan osalta 90 % käyttöajasta. Kyseisen 2016 vuonna käyttönotetun kohteen kohdalla älyohjauksen voidaan siis todeta ohjaavan patteriverkostoa energiatehokkaasti ja samalla pitäen rakennuksen keskilämpötilan hyvän sisäilmaston tavoitearvojen rajoissa. Kuviosta ei kuitenkaan käy täysin ilmi, onko tilastolliset käyttöveden aamuiset kulutuspiikit madaltaneet patteriverkoston menoveden lämpötilaa. Tämän perusteella voidaan olettaa, että kysynnänjousto kyseisen älyjärjestelmän kohdalla on pääasiassa sisälämpötilojen perusteella ohjautuvaa.



Kuvio 42. Kohde 4 lämpötilatiedot lämmityskauden ajalta (Älyohjaus 1)

Lämmityskauden sisälämpötilojen ja patteriverkoston menoveden lämpötiloja voidaan puolestaan tarkastella kuvion 42 avulla. Koko lämmityskauden osalta on havaittavissa, että etenkin loka-marraskuussa rakennuksen keskilämpötilat ovat ajoittain laskeneet alle  $20^{\circ}\text{C}$ . Vastaavaan aikaan voidaan toki huomata, että älyohjauksen mukainen asetusarvo on perinteistä patteriverkoston menoveden asetusarvoa korkeampi. Tämän perusteella voidaan olettaa, että lämmitysenergian kulutus on ollut perinteistä menetelmää suurempaa, mutta lämpötilaolosuhteet on saavutettu perinteistä ohjausta paremmin. Muun lämmityskauden kohdalla puolestaan älyohjaus 1 on asettanut patteriverkoston menoveden lämpötilan perinteistä menetelmää alemmalle tasolle, mutta rakennuksen keskilämpötilat ovat pysyneet  $20^{\circ}\text{C}$ – $22^{\circ}\text{C}$  välillä.

Sisälämpötilojen pysyvyyden kannalta voidaan todeta, että järjestelmän ohjaus pyrkii pitämään rakennuksen keskilämpötilan mahdollisimman lähellä tavoitearvoa. Rakennuksen sisälämpötilojen

ohjaama lämmitysjärjestelmä ei aina toimi perinteistä menoveden lämpötilan säätöä energiatehokkaammin, mutta edellä osoitettujen esimerkkien avulla voidaan huomioida, että ohjaus on oletettavasti edesauttanut hyvää sisäilmastoa (kuvio 42). Pitkällä aikavälillä tarkasteltuna älyohjauksella toimiva lämmitysjärjestelmä operoi perinteistä järjestelmää alemmilla menoveden lämpötiloilla tässä työssä tarkastelluissa kohteissa. Tämän perusteella voidaan todeta, että tarkastelussa olleet älyohjauksen alaiset vesikiertoiset lämmitysverkostot ovat lämmitysenergiaa vähemmän käyttäviä järjestelmiä, kuten edellä mainitut kuviot osoittavat (Suomäki & Vepsäläinen 2013, 65; Energiansäästö on varautumista 2022).

## **7 Yhteenveto ja pohdinta**

### **7.1 Opinnäytetyön tulokset ja toteutus**

Opinnäytetyön tutkimuskysymykset liittyivät älyohjauksen mahdollistamiin taloudellisiin säästöihin lämmitysenergian osalta, rakennusten lämmityksen päästövaikutuksiin ja sisälämpötilojen pysyvyyteen asetetuilla tavoitetasoilla. Näiden lisäksi vertailtiin, onko erilaisten rakennustyyppien välillä selkeitä eroavaisuuksia älyohjautuvan lämmitysjärjestelmän soveltuvuuden osalta. Rakennustyypeiksi valikoitui varhaiskasvatuksen ja yleissivistävien oppilaitosten rakennuksia neljältä eri vuosikymmeneltä. Tulosten esittämiseksi tavoiteltiin mahdollisimman havainnollistavaa taulukkolaskentatyökalua, josta voitiin tarkastella työssä tutkittuja tekijöitä.

Valittujen tarkastelukohteiden ja työssä käytettyjen tarkastelumenetelmien perusteella voitiin huomata, että älyohjauksen käyttöönoton myötä lämmitysenergian tarve ja siitä koituvat päästöt laskivat lähes poikkeuksetta. Poikkeuksena olivat yksittäiset 1950- ja 1980- luvulla käyttöönotetut yleissivistävän oppilaitoksen rakennukset, joissa normeerattu lämpöenergiankulutus oli suurempaa lämmityskaudella 2022–23 kuin 2021–22. Suuremmasta lämpöenergiatarpeesta huolimatta 1980-luvun rakennuksen osalta teoreettiset lämmityskulut laskivat, kun kaukolämmön huipputeho oli aiempia vuosia alhaisempi. (Liite 1.) Tarkastelukohteiden osalta saavutetut taloudelliset hyödyt olivat pääasiassa suuremmat kuin älyohjauksen käytöstä koituneet palvelu-, rajapinta- ja mittalaittemaksut. Opinnäytetyön liitteenä olevassa taulukossa (Liite 1) ei osoiteta saavutettuja taloudellisia hyötyjä, mutta toimeksiantajan versiossa on nähtävissä kohdekohtaiset säästöt, joka mahdollistaa tarkemman arvion esimerkiksi käytettävien mitta-anturien määrästä kohteissa.

Kaukolämmön tehohiippujen laskua tapahtui kaikissa älyohjauksen alaisissa ja ennen 2010-lukua rakennetuissa tarkastelukohteissa. 2010-luvun rakennusten osalta vuoden 2022 tehohiiput laskevat vuoden 2021 tehohiipuista yhtä rakennusta lukuun ottamatta. Tehohiippujen mahdollinen nousu vuotta 2022 aikaisempiin vertailuvuosiin nähden ei kuitenkaan näkynyt taloudellisesti negatiivisena vaikutuksena, sillä kaikissa tarkastelukohteissa lämmityskustannukset olivat vuonna 2022 alhaisemmat aikaisempiin tarkasteluvuosiin verrattuna. Todennäköisesti tämä selittyy kappaleessa 4.5.1. todetulla tuloilman lämmityksen merkityksellä. Kappaleessa todettiin, että julkisissa rakennuksissa tuloilman lämmityksen osuus rakennuksen kokonaislämmitystarpeen osalta on merkittävä. Tämän lisäksi 2010-luvun rakennuksissa käytettiin pääsääntöisesti matalan menoveden lattialämmitystä ilmanvaihdon ohella. Älyohjauksella vaikutettiin ainoastaan lattialämmityksen ohjaukseen, jonka muodostamat tehohiiput ovat oletettavasti melko vähäiset. Uusien rakennusten ilmatiiveys ja lämmönvarauskyky on vanhoja rakennuksia kehittyneempiä, joka osaltaan vaikuttaa lämmitystehontarpeeseen.

Tehohiippujen vertailun osalta tulee tiedostaa ulkolämpötilan merkitys lämmitystehontarpeen osalta. Lyhyen tarkastelujakson takia tehohiippujen vertailu on suppea ja yksittäisen vuoden alhaiset tai korkeat ulkolämpötilat voivat vaikuttaa saatuihin tuloksiin. Alentuneet kokonaislämmityskustannukset olivat havaittavissa myös tarkastelukohteissa, joissa toimii perinteiset ohjauksen alaiset vesikiertoiset lämmitysjärjestelmät. Tähän perustuen taloudellisten hyötyjen luotettava vertailu vaatii tätä opinnäytetyötä laajemman vertailujakson, jotta älyohjauksen mahdollistamat hyödyt voidaan todeta luotettavammin.

Opinnäytetyössä nostettiin esille sisälämpötilojen merkitys lämmitysjärjestelmien toiminnan arvioinnissa. Sisälämpötilojen osalta tarkastelua ei toteutettu kovin yksityiskohtaisesti, koska tarkastelussa olleiden rakennusten käyttäjiltä ei tullut palautetta sisäilmaston ongelmista lämmityskauden 2022–23 aikana. Sisälämpötiloja päädyttiin tarkastelemaan yleisellä tasolla ja todettiin, että älyohjaukselta käyttävien rakennusten lämpötilatasot pysyivät pääsääntöisesti vaaditulla hyvän sisäilmastoluokan tasolla. Sisälämpötilojen yksityiskohtainen tarkastelu jouduttiin myös rajaamaan pienemmälle tarkastelulle, jotta työn laajuus ja työresurssit pysyivät suunnitelluissa rajoissa. Lisähaasteen kohteiden väliseen vertailuun tuos se, että älyohjaukselta käyttämättömissä rakennuksissa on huomattavasti vähemmän sisälämpötiloja mittaavia antureita. Sisälämpötilojen yksityiskohtaisempaa tarkastelua on aihetta jatkaa tulevaisuudessa.

Älykkäiden lämmitysjärjestelmien tarkastelu jäi toivottua pienemmäksi, koska kyseisiä järjestelmiä oli tarkasteluhetkellä käytetty vain reilun vuoden ajan. Älyohjaus 1:n osalta tarkastelukohteita löytyi riittävästi, mutta tulosten luotettavuuteen tulee suhtautua varauksella lyhyen käyttöajan takia. Kyseistä järjestelmää on käytetty marraskuusta 2021 alkaen, joten järjestelmän hyötyjen ja haittojen tarkastelu rajoittui yhteen lämmityskauteen. Opinnäytetyössä oli lähtökohtaisesti tarkoitus tarkastella kahden eri toimijan järjestelmiä, mutta älyohjaus 2:n käyttö oli tarkasteluhetkellä liian vähäistä luotettavan tarkastelun laatimiseksi. Työssä laadittu työkalu soveltuu myös älyohjaus 2:n analysointiin, joten kyseinen taulukkolaskentatyökalu toimii myös tämän järjestelmän osalta lähtökohtana tulevaisuuden tarkasteluissa.

Kehittämistyön tulosten perusteella toimeksiantajalla on mahdollisuus tarkastella pilotoidun järjestelmän hyötyjä ja perustella mahdollisia lisäkohteita pilotoinnille. Uudiskohteiden osalta ympäristöministeriön asetus 718/2020 painottaa energiatehokkaiden ja sisäilmaston huomioivan lämmitysjärjestelmän tärkeyttä (A 718/2020, 6§). Vanhemman rakennuskannan osalta puolestaan kustannustehokkaiden ja sisäilmaston huomioivien ratkaisujen hyödyntämistä on järkevää tarkastella, kunhan vesikiertoiset lämmitysjärjestelmät ovat lähtökohtaisesti tasapainoiset.

## **7.2 Rakennusten lämmityksen päästöt ja älykkäät lämmitysjärjestelmät**

Opinnäytetyössä on todettu, että alentuneen lämmitysenergian tarpeen myötä rakennusten lämmityksestä koituneet hiilidioksidipäästöt laskevat. Tarkastelukohteiden päästövaikutusten vertailussa käytettiin 2022 vuoden päästökerrointa, jotta tulokset olivat keskenään vertailukelpoisia. Älyohjattujen lämmitysjärjestelmien alaisten kohteiden kohdalla kyettiin toteamaan, että päästöt laskivat, mutta todellisuudessa voidaan todeta, että suurempi vaikutus on ollut lämmöntuotosta koituvilla hiilidioksidipäästöillä. Tampereen kaupungin asettaman tavoitteen myötä uusiutuvan energian osuus Tampereen Sähkölaitoksen energiatuotannossa tulee olla 80 % vuoteen 2025 mennessä ja vuoteen 2030 mennessä uusiutuvan energian osuus tulee olla 90 %, kun se vuonna 2021 on ollut 40 % (Hiilineutraali Tampere 2030 2020). Pelkästään kyseisen tavoitteen myötä toimeksiantajan rakennusten lämmityksestä koituvat päästöt tulevat laskemaan reilusti.

Kaukolämmön ja uusiutuvan energiantuotannon kehittymisen myötä fossiilisten polttoaineiden käyttö on tarkoitus lopettaa kokonaisuudessaan vuoteen 2030 mennessä (Hiilineutraali Tampere

2030 2020). Tämä tarkoittaa myös sitä, että tämän hetken huipputeholaitosten tilalle on kehitettävä vaihtoehtoisia menetelmiä, jotta kylmien talvipäivien huipputehotarpeet kyetään toteuttamaan. Huipputehojen ja lämmitystarpeen takaamisen tueksi on kaavailtu lämpöakkuja, joiden avulla kaukolämpöverkkoon voidaan päästää varastoitua lämpöä, kun lämpöä ei ole riittävästi saatavilla tuotantolaitoksilta tai siihen liitettyjen tuottajien puolesta. Kaukolämpöakkuihin puolestaan varataan lämpöä, kun tuotanto ylittää kaukolämpöverkon tarpeen. (Jurkko 2022.) Hiilineutraali Tampere 2030- tiekartassa mainitaan kaukolämpöakut älykkään kaukolämmön rinnalla ja vuonna 2023 julkaistussa Petteri Orpon hallitusohjelmassa nostetaan esille, että sähkö- ja lämmönvarastojen rakennusmahdollisuuksia tulee edistää (Vahva ja välittävä Suomi 2023, 136). Tulevaisuuden tavoitteiden voidaan todeta olevan yhtenäiset lämmöntuotannon ja varastoinnin suhteen.

Kaukolämmön tuotannon siirtyessä hiilidioksidipäästöiltään alhaisempiin menetelmiin, älykkäiden lämmitysjärjestelmien vaikutus koko kaukolämpöverkoston toimintaa tukevana tekijänä voi osoittautua positiiviseksi. Huipputehokattiloiden poistumisen myötä kaukolämmön varastoinnin merkitys kasvaa. Varastoinnin osalta älykkäät lämmitysjärjestelmät todennäköisesti edesauttavat verkoston tasapainoa, koska huipputehon tarve ei ohjautuisi ainoastaan ulkolämpötilan perusteella, vaan rakennuksen lämmitystarvetta ohjaa todelliset sisäilmaolosuhteet. Tämän lisäksi älyohjauksella voidaan leikata esimerkiksi patteriverkostojen huipputehon tarvetta ohjelmallisesti, kun kaukolämpöverkon lämpökapasiteetti on alhainen. Älykkään lämmittämisen myötä vesikiertoisten järjestelmien ohjautuvuus ei olisi ainoastaan reaktiivista, vaan myös ennakoitua ja taloudellisempaa. Rakennusten näkökulmasta älyohjauksen tärkein tehtävä on tästä huolimatta pyrkiä tasaamaan rakennusten sisälämpötilat ottamalla huomioon muun muassa hetkellinen lämmitystarve, sääennusteet ja lämpökuormat.

Työn aikana pystyttiin osoittamaan, että älyohjautuvat järjestelmät osoittautuivat pääasiassa taloudellisesti kannattaviksi. Vaikka yksittäisen kohteen taloudellinen säästö ja lämmitysenergian tarpeen määrän alentuminen eivät olisi merkittäviä, niin ne voivat suuren kiinteistömäärän myötä tuoda huomattavia hyötyjä. Hiilineutraalia tulevaisuutta tavoitellessa kyseiset saavutukset ovat eduksi, mutta säästöjen tavoittelun ei tulisi olla terveellistä ja turvallista sisäilmastoa tärkeämpää. Työssä saatujen tulosten ja tulevaisuuden kaukolämpöverkon ratkaisujen myötä älykkäille lämmitysjärjestelmille voidaan olettaa olevan kysyntää kokonaiskuvaa hyödyntävänä tekijänä.

## Lähteet

A 1009/2017. Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen sisäilmastosta ja ilmanvaihdosta. Suomen säädöskokoelma. Viitattu 31.3.2023. <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2017/20171009#Pidm45053758820384>.

A 1047/2017. Ympäristöministeriön asetus rakennusten vesi- ja viemärlaitteistoista. Viitattu 9.4.2023. <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2017/20171047#Pidm45053756297600>.

A 545/2015. Sosiaali- ja terveysministeriön asetus asunnon ja muun oleskelutilan terveydellisistä olosuhteista sekä ulkopuolisten asiantuntijoiden pätevyysvaatimuksista. Viitattu 29.4.2023. <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2015/20150545#Pidm45053755703264>.

A 718/2020. Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen teknisten järjestelmien energiatehokkuuden vaatimuksista. Viitattu 31.3.2023. <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2020/20200718#Pidm45053758493072>.

Çengel, Y., Boles, M., Kanoglu, M. 2019. Thermodynamics: An engineering approach. 9. painos. New York: McGraw-Hill Education.

CO<sub>2</sub>-päästökertoimet. 2023. Artikkelit Motivan sivuilla. Päivitetty 17.5.2023. Viitattu 7.7.2023. [https://www.motiva.fi/ratkaisut/energiankaytto\\_suomessa/co2-paastokertoimet](https://www.motiva.fi/ratkaisut/energiankaytto_suomessa/co2-paastokertoimet).

Direktiivi 2010/31/EU. Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi rakennusten energiatehokkuudesta. Euroopan unionin virallinen lehti 18.6.2010. Viitattu 29.6.2023. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/PDF/?uri=CELEX:32010L0031&from=RO>.

Energiasäästö on varautumista. 2022. Artikkelit Motivan sivuilla. Julkaistu 16.11.2022. Viitattu 18.5.2023. [https://www.motiva.fi/koti\\_ja\\_asuminen/energiansaasto\\_on\\_varautumista](https://www.motiva.fi/koti_ja_asuminen/energiansaasto_on_varautumista).

Energiatehokas ilmanvaihto. 2012. Motiva. Viitattu 29.4.2023. [https://www.motiva.fi/files/6147/Energiatehokas\\_ilmanvaihto2012.pdf](https://www.motiva.fi/files/6147/Energiatehokas_ilmanvaihto2012.pdf).

Energiavuosi 2022 – Kaukolämpö. 2023. Energiateollisuus. Julkaistu 26.1.2023. Viitattu 9.4.2023. [https://energia.fi/files/5650/Kaukolampovuosi\\_2022.pdf](https://energia.fi/files/5650/Kaukolampovuosi_2022.pdf).

Energy consumption in households. N.d.. Official Statistics of Finland (OSF). Viitattu 28.6.2023. Verkkojulkaisu ISSN=2323-329X. Helsinki: Statistics Finland. [http://www.stat.fi/til/asen/kas\\_en.html](http://www.stat.fi/til/asen/kas_en.html).

Hiilineutraali Tampere 2030. 2020. Tampereen kaupunki. Julkaistu 31.8.2020. Viitattu 7.5.2023. [https://www.tampere.fi/sites/default/files/2022-05/hiilineutraali\\_tampere\\_2030\\_tiekartta.pdf](https://www.tampere.fi/sites/default/files/2022-05/hiilineutraali_tampere_2030_tiekartta.pdf).

Hiilineutraali Tampere 2030. N.d.. Sisältöä Tampereen ilmasto- ja ympäristövahti verkkosivuilta. Viitattu 2.8.2023. [https://ilmastovahti.tampere.fi/paastoskenaariot/node/district\\_heating\\_emission\\_factor](https://ilmastovahti.tampere.fi/paastoskenaariot/node/district_heating_emission_factor).

Hyvä tieteellinen käytäntö, tietosuoja ja tutkimuslupa. N.d.. Sisältöä Jamk: in verkkosivuilta. Viitattu 11.6.202. [https://oppimateriaalit.jamk.fi/opinnaytetyo/projektisuunnitelma-aika-  
taulu/htk\\_tietosuoja/](https://oppimateriaalit.jamk.fi/opinnaytetyo/projektisuunnitelma-aika-<br/>taulu/htk_tietosuoja/).

Jurkko, K. 2022. Lämpöakku lämmittää koteja talvella. Blogi-kirjoitus Oulun Energian sivuilla. Julkaistu 25.1.2022. Viitattu 1.8.2023. [https://www.oulunenergia.fi/ajankohtaista/blogi/lampoakku-  
lammittaa-koteja-talvella/](https://www.oulunenergia.fi/ajankohtaista/blogi/lampoakku-<br/>lammittaa-koteja-talvella/).

Kailio, A. 2022. Älykäs lämmönsäätö säästää energiaa. Tekniikka & Talous 2.12.2022, 5. Viitattu 28.05.2023. <https://emagz.fi/reader/issue/10125/328321/4>.

Kaksisuuntaisen kaukolämmön liiketoimintamallit. 2017. Energiateollisuus. Viitattu 9.4.2023. [https://www.sitra.fi/app/uploads/2017/02/Kaksisuuntaisen\\_kaukolammon\\_liiketoimintamallit-  
2.pdf](https://www.sitra.fi/app/uploads/2017/02/Kaksisuuntaisen_kaukolammon_liiketoimintamallit-<br/>2.pdf).

Kananen, J. 2015. Kehittämistutkimuksen käytännön opas: Miten kirjoitan kehittämistutkimuksen vaihe vaiheelta. Jyväskylä: Jyväskylän ammattikorkeakoulu.

Kaukolämmön Kysynnänjousto. 2015. Energiateollisuus. Julkaistu 31.8.2015. Viitattu 12.5.2023. [https://energia.fi/files/439/Kaukolammon\\_kysyntajousto\\_loppuraportti\\_VALOR.pdf](https://energia.fi/files/439/Kaukolammon_kysyntajousto_loppuraportti_VALOR.pdf).

Korkala, T. 2021. Lämmitys - Hoito ja huolto. 3. uudistettu painos. Helsinki: Kiinteistömedia.

Kulutusten normitus. 2023. Artikkelit Motivan sivuilla. Julkaistu 3.1.2023. Viitattu 28.6.2023. [https://www.motiva.fi/julkinen\\_sektori/kiinteiston\\_energiankaytto/kulutuksen\\_normitus](https://www.motiva.fi/julkinen_sektori/kiinteiston_energiankaytto/kulutuksen_normitus).

Kulutuksen normitus – Laskentakaavat ja -ohjeet. 2023. Motiva. Julkaistu tammikuussa 2023. Viitattu 28.6.2023. [https://www.motiva.fi/files/20935/Motiva\\_Kulutuksenormitus\\_laskentakaavat-  
ja-ohjeet\\_01-2023.pdf](https://www.motiva.fi/files/20935/Motiva_Kulutuksenormitus_laskentakaavat-<br/>ja-ohjeet_01-2023.pdf).

Laskutusvesivirta asiakkaan tehomaksun perusteena. N.d.. Tampereen Sähkölaitos. Viitattu 7.7.2023. [https://www.sahkolaitos.fi/globalassets/tiedostot/ohjeet-ja-opasteet/sahkolaitos/muut-  
dokumentit/laskutusvesivirta\\_tehomaksu.pdf](https://www.sahkolaitos.fi/globalassets/tiedostot/ohjeet-ja-opasteet/sahkolaitos/muut-<br/>dokumentit/laskutusvesivirta_tehomaksu.pdf).

Lähilämpö myyntihinnasto. 2022. Tampereen Sähkölaitos. Yritysassiakkaiden myyntihinnasto. Julkaistu 1.1.2022. Viitattu 7.7.2023. [https://www.sahkolaitos.fi/globalassets/tiedostot/ohjeet-ja-  
opasteet/sahkolaitos/hinnastot-ja-sopimusehdot/lahilampo\\_myyntihinnasto\\_yrityk-  
set\\_010122.pdf](https://www.sahkolaitos.fi/globalassets/tiedostot/ohjeet-ja-<br/>opasteet/sahkolaitos/hinnastot-ja-sopimusehdot/lahilampo_myyntihinnasto_yrityk-<br/>set_010122.pdf).

Myyryläinen, L. 2019. Rakennusten elinkaari, energia ja kunto. Helsinki: Rakennustieto.

Ojasalo, K. Moilanen, T. Ritalahti, J. 2018. Kehittämistyön menetelmät: uudenlaista osaamista liiketoimintaan. 3.–5. painos. Helsinki: Sanoma Pro.

Ominaiskulutukset palvelusektorilla. 2023. Sisältöä Motivan sivuilta. Päivitetty 27.1.2023. Viitattu 29.6.2023. [https://www.motiva.fi/ratkaisut/energiakatselmustoiminta/tuetut\\_energiakatselmuk-  
set/tilastotietoa\\_katselmuksista/ominaiskulutukset\\_palvelusektorilla](https://www.motiva.fi/ratkaisut/energiakatselmustoiminta/tuetut_energiakatselmuk-<br/>set/tilastotietoa_katselmuksista/ominaiskulutukset_palvelusektorilla).

Pan, Y., Huang, Z. & Wang, Q. 2013. Building energy use predictions using time series analysis. Viitattu 9.8.2023. [https://www.researchgate.net/publication/261168634\\_Building\\_Energy\\_Use\\_Prediction\\_Using\\_Time\\_Series\\_Analysis](https://www.researchgate.net/publication/261168634_Building_Energy_Use_Prediction_Using_Time_Series_Analysis).

Rakennusten kaukolämmitys. 2021. Energiateollisuus. Määräykset ja ohjeet, Julkaistu 22.10.2021. Viitattu: 31.3.2023. [https://energia.fi/files/6412/Julkaistu\\_K1\\_2021\\_Rakennusten\\_kaukolammitys\\_Maaraykset\\_ja\\_ohjeet\\_%28pdf%29.pdf](https://energia.fi/files/6412/Julkaistu_K1_2021_Rakennusten_kaukolammitys_Maaraykset_ja_ohjeet_%28pdf%29.pdf).

Resurssiviisasta lämpöä kysyntäjoustolla. 2020. Blogi-kirjoitus Alvan sivuilla. Julkaistu 10.1.2020. Viitattu 4.6.2023. <https://www.alva.fi/blog/2020/01/10/resurssiviisasta-lampoa-kysyntajoustolla/>.

RT 07-11299. 2018. Sisäilmastoluokitus 2018. Sisäympäristön tavoitearvot, suunnitteluohjeet ja tuotevaatimukset. Rakennustieto. Viitattu 31.3.2023. RT-kortisto.

RT 103453. 2022. Nestekiertoiset lämmitys- ja jäähdytysverkot. Huonelämpötilojen säätö. Ohjeet. Rakennustieto. Viitattu 27.5.2023. RT-Kortisto.

ST 710.10. 2017. Rakennusautomaatiojärjestelmän hyödyntäminen. Sähkötieto. Viitattu 30.3.2023. ST-kortisto.

ST. 21.34. N.d.. Ohjeita energiamittausten ja energiahallintajärjestelmien toteutukseen. Sähkötieto. Viitattu 30.3.2023. ST- kortisto.

ST-Käsikirja 17. 2018. Rakennusautomaatiojärjestelmät. Tietotekniset järjestelmät. Sähkötieto. Viitattu 30.3.2023. ST-kortisto.

ST-Ohjeisto. 20. 2020. Automaation vaikutus rakennusten energiatehokkuuteen. Opas standardin SFS-EN 15232 käyttöön. Viitattu 30.3.2023. ST-kortisto.

Suomäki, J. & Vepsäläinen, S. 2013. Talotekniikan automaatio – käyttäjän opas. 1. painos. Helsinki: Kiinteistöalan kustannus.

Sähkön ja lämmön alkuperätiedot. N.d.. Tampereen Sähkölaitos. Viitattu 12.7.2023. [https://www.sahkolaitos.fi/asiakaspalvelu/sahkon-ja-lammon-alkuperatiedot/#A\\_1](https://www.sahkolaitos.fi/asiakaspalvelu/sahkon-ja-lammon-alkuperatiedot/#A_1).

Talja, J. 2018. Savings of 10-30 per cent with a smart heating system: "Even in a zero energy building, it was possible to reduce the use of district heating". Artikkelin WWF:n sivuilla. Julkaistu 28.6.2018. Viitattu 4.6.2023. <https://wwf.fi/uutiset/2018/06/savings-of-10-30-per-cent-with-a-smart-heating-system-even-in-a-zero-energy-building-it-was-possible-to-reduce-the-use-of-district-heating/>.

Tampereen Tilapalvelut. N.d.. Sisältöä verkkosivuilta. Viitattu 7.5.2023. <https://tampereentilapalvelut.fi/me>.

Tilastoja vuodesta 1961. N.d.. Tilastotietoa Ilmatieteenlaitoksen verkkosivuilta. Viitattu 6.7.2023. <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/tilastoja-vuodesta-1961>.

Two-way district heating creates a heat trading market for the customer. 2016. Artikkelel Sitran sivuilla. Julkaistu 23.9.2026. Viitattu 4.6.2023. <https://www.sitra.fi/en/news/two-way-district-heating-creates-heat-trading-market-customer/>.

Vahva ja välittävä Suomi: Pääministeri Petteri Orpon hallitusohjelma 20.6.2023. 2023. Valtioneuvoston julkaisu 2023:58. Viitattu 2.8.2023. Valtioneuvosto. <https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/165042/Paaministeri-Petteri-Orpon-hallituksen-ohjelma-20062023.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

# Liitteet

## Liite 1. Tulosten esittelytaulukko

Kohde	Rakennusvuosi	Älyohjaus ennen vuotta 2022	Antureiden määrä [kpl]	Lämmin tilavuus [m³]	Säästyneet energiakustannukset - palvelumaksut		Kaukolämmön normeerattu ominaiskulutusmuutos vrt. lämmityskausi 2019-2020			Normeerattu ominaiskulutus 2022-23 vs. 2021-22 kWh/m³	Normeeratun kulutuksen mukainen päästömuutos		Tehohiiput laskeneet	
					Hyötyä 2022 vs. 2019-21 keskiarvo	Hyötyä 2022 vs 2021	2020-21 kWh/m³	2021-22 kWh/m³	2022-23 kWh/m³		2022 vs. 2019	2022 vs. 2021	2022 vs 2019	2022 vs 2021
Kohde 1	2019	Ei	0	17 380			-6,5	-12,0	-15,3	-3,3	-49 %	-26 %	Kyllä	Ei
Kohde 2	2019	Ei	0	10 650			-2,4	-13,3	-14,0	-0,7	-47 %	-26 %	Ei	Ei
Kohde 3	2017	Kyllä	5	8 852	Kyllä	Kyllä	-0,4	-17,6	-17,8	-0,2	-43 %	-27 %	Ei	Ei
Kohde 4	2016	Kyllä	5	33 099	Kyllä	Kyllä	-0,7	-5,5	-6,1	-0,6	-30 %	-20 %	Ei	Kyllä
Kohde 5	2014	Kyllä	15	6 985	Kyllä	Kyllä	-6,1	-8,0	-10,1	-2,1	-28 %	-13 %	Kyllä	Kyllä
Kohde 6	1988	Ei	0	7 676			3,2	11,2	13,3	2,1	19 %	9 %	Ei	Kyllä
Kohde 7	1987	Kyllä	16	16 570	Kyllä	Kyllä	0,6	-7,6	-7,3	0,3	-22 %	-14 %	Kyllä	Kyllä
kohde 8	1986	Ei	0	21 320			4,04	6,4	2,1	-4,3	3 %	-2 %	Ei	Ei
Kohde 9	1981	Kyllä	17	5 590	Kyllä	Kyllä	-3,4	-19,2	-19,7	-0,5	-32 %	-18 %	Kyllä	Kyllä
Kohde 10	1957	Ei	0	23 800			-0,8	-1,5	-2,4	-0,9	-13 %	-2 %	Kyllä	Kyllä
Kohde 11	1954	Kyllä	50	45 785	Ei	Kyllä	2,19	0,1	0,85	0,7	-6 %	-2 %	Kyllä	Kyllä
Kohde 12	1924	Kyllä	Automaatio	46 693	Kyllä	Kyllä	-0,5	-2,9	-4,2	-1,3	-26 %	-12 %	Kyllä	Kyllä
Kohde 13	1924	Ei	0	29 600			-0,3	-0,6	0,57	1,2	-17 %	1 %	Kyllä	Kyllä

## Liite 2. Tilapalveluiden asiantuntija 1

### 1. Kyselyn vastauspäivämäärä \*

4/11/2023

### 2. Mitä sidosryhmää edustat? \*

- Kaukolämmön tuottaja
- Kysynnänjousto-ohjelman tarjoaja
- Kiinteistöjohtaminen (Tilapa)

### 3. Millaiset kokemukset teillä on toistaiseksi kysynnänjousto-ohjelmien toimivuudesta rakennusten lämmitysjärjestelmien ohjauksessa? \*

Kysynnänjoustoa on toteutettu monessa rakennuksessa. Omasta mielestäni kysynnänjousto on ollut enemmän sisäilman optimointia. Koulu ja päiväkotikohteissa käyttäjältä ei ole tullut palautetta suuntaan tai toiseen.

### 4. Onko kysynnänjousto-ohjauksen kohdalla noussut esiin joitakin tiettyjä haasteita tai onko huomattu soveltumattomuutta tiettyjen rakennusten/rakennustyyppien kohdalla? \*

Rajapintojen avaukset järjestelmästä toiseen ollut haastavia ja rajapintojen ylläpito tuottanut jonkin verran työtä (RAU <-> kysynnänjousto ohjaus). Monessa kohteessa oli vanhoja rau järjestelmiä, joissa ei ollut kysynnänjoustoa mahdollistavia rajapintoja. Jos patteriverkosto ei ole ollut tasapainossa, niin sisäilman optimointi ollut haastavaa. Turhien hälytysten estäminen rakennusautomaatiassa. Esim kysynnän jousto yrittää asettaa liian alhaista tai korkeaa lämpötila-asetus lämmitysverkostoon.

### 5. Mikä on mielestänne tärkein osa-alue, jota rakennuksen lämmitystä ohjaavan kysynnänjoustopuolisen tulisi edistää? Tehohippujen ja sitä myötä kustannusten madallus, olosuhteiden optimointi, käytetyn lämmitysenergian vähentäminen yleisesti vai joku muu? \*

1. Olosuhteiden optimointi. 2. Tehohippujen leikkaus. 3. Energian säästö (tämä aika pientä, koska julkisissa rakennuksissa patteriverkoston vaikuttavuus noin 30% koko rakennuksen kaukolämpöenergiasta)

### 6. Vapaa sana. Jos teillä on mielessänne jokin asia rakennusten lämmitysjärjestelmiä ohjaavan kysynnänjoustopuolisen osalta, niin tähän kohtaan voi kirjoittaa vapaassa muodossa mahdollisuuksista, haasteista ja erityisistä huomioista yms., joita haluatte nostaa esille.

Huoneantureiden sijoittelu oikeisiin paikkoihin todella tärkeää. (jotta pystytään säätämään optimaalisesti)

More options for Responses

## Liite 3. Tilapalveluiden asiantuntija 2

### 1. Kyselyn vastauspäivämäärä \*

4/12/2023

### 2. Mitä sidosryhmää edustat? \*

- Kaukolämmön tuottaja
- Kysynnänjousto-ohjelman tarjoaja
- Kiinteistöjohtaminen (Tilapa)

### 3. Millaiset kokemukset teillä on toistaiseksi kysynnänjousto-ohjelmien toimivuudesta rakennusten lämmitysjärjestelmien ohjauksessa? \*

Kokemukseni rajoittuu kahden toimijan tarjoamaan kaukolämmön kysynnänjousto-ohjelmaan. Sähkön kysynnänjousto-ohjauksia meillä ei tietääkseni ole ollut testissä. Oikeastaan näissä käytössä olevissakaan kyse ei ole puhtaasti kysynnän joustosta, vaan pikemminkin kaukolämpöenergian kulutuksen optimoinnista sekä tehopiikin leikkauksesta. Järjestelmien kyky leikata huoneiltojen yllämmöt ja säätää huonelämpötilojen keskiarvo asetettuun asetusarvoon on hyvä, toisin sanoen koodi toimii oikein hyvin. Usean kohteen lämmitysenergiankulutus on ohjauksen käyttöönoton jälkeen laskenut, joskaan systemaattista prosentuaalista kulutusta ei ole nähtävissä. Ohjauksen vaikuttavuus rakennuksen kokonaisenergiankulutukseen on pienehkö, erityisesti kohteissa joissa on suuret ilmamäärät. Asennettuun kantaan nähden lämpötilaolosuhteista on tullut huomautuksia vähän. Järjestelmän käyttöliittymä siihen liittyvinen trendiseuraintoimen on hyvä. Tällainen huoneolosuhteiden optimointi soveltuu erityisesti rakennuksiin, joiden lämpöenergian varauskyky on hyvä, lämmitysverkosto on kohtuullisen hyvin tasapainotettu ja lämmitettävää pinta-alaa on paljon.

### 4. Onko kysynnänjousto-ohjauksen kohdalla noussut esiin joitakin tiettyjä haasteita tai onko huomattu soveltumattomuutta tiettyjen rakennusten/rakennustyyppien kohdalla? \*

Kerron pari esimerkkiä: 1) Rossipohjainen perusrakennettu päiväkotirakennus, jossa radiaattorilämmitys (radiaattorit normaalisti ikkunoitten alapuolella). Lattian lämpötila on talvella viileä, henkilökuunta ja lapset istuvat paljon lattialla. Vaikka huonelämpötilamittaukset näyttivät 21 astetta, huonelämpötila ja lattian pintalämpötila koettiin hyvin viileäksi. Tehopiikin leikkauksessa patteriverkoston lämpötila vielä laski, joten lämpöolosuhteen vaihtelu ja viileät pintalämpötilat koettiin hyvin vetoisaksi. 2) Rakennus, jossa julkisia tiloja sekä henkilökuunnan työskentelytiloja. Lämpökuormat ja henkilökuormitus vaihtelevat huomattavasti eri tilojen välillä, lisäksi pohjakerroksen työskentelytiloissa ns. kylmäsiltoja. Ohjaus säätää huonelämpötilojen keskiarvon asetusarvoon. Samanaikaisesti julkisissa tiloissa oli yllämpöä ja työskentelytiloissa alilämpöä. Ohjaus otettiin pois käytöstä, kunnes lämmitysjärjestelmän patteriventtiilit ja termostaatit on uusittu ja lämmitysjärjestelmä on tasapainotettu. 3) Nykyiset järjestelmät eivät tarkkaile tuloilman lämpötiloja. Mikäli ilmanvaihtokojeiden tuloilman asetusarvoja ei erikseen säädetä ja tarkkailla, on vaarana, että automatiikka alkaa lämmitää tiloja tuloilman kautta.

### 5. Mikä on mielestänne tärkein osa-alue, jota rakennuksen lämmitystä ohjaavan kysynnänjoustopuolteen tulisi edistää? Tehohuippujen ja sitä myötä kustannusten madallus, olosuhteiden optimointi, käytetyn lämmitysenergian vähentäminen yleisesti vai joku muu? \*

Kysynnänjoustopuolteen tulisi palvella sekä rakennuksen omistajaa että lämmöntuottajaa. Tavoitteena tulisi olla kokonaiskustannusten alennus olosuhteita heikentämättä. More options for Responses hinnoittelulla on tunnetusti vaikutusta ohjaava vaikutus, joten näkisin, että lämmöntuottajan rooli olisi yksinkertaisimmillaan tarjota tuntihinnoiteltua lämpöenergiaa ja sovellus, josta kiinteistön hallintajärjestelmä voisi etukäteen lukea tuota tietoa (vrt. sähkön tuntihinnoittelu). Itse kysynnänjousto tehtäisiin kiinteistössä kiinteistön ominaispiirteet huomioon ottaen ja jouston hyöty näkyisi automaattisesti energialaskussa.

### 6. Vapaa sana. Jos teillä on mielestänne jokin asia rakennusten lämmitysjärjestelmiä ohjaavan kysynnänjoustopuolteen osalta, niin tähän kohtaan voi kirjoittaa vapaassa muodossa mahdollisuuksista, haasteista ja erityisistä huomioista yms., joita haluatte nostaa esille.

Julkisuudessa on esitetty ideoita, että kiinteistöjen lämpöpumppujärjestelmät toimisivat lämmönlähteinä esimerkiksi tilanteissa, joissa kaukolämmön tuotantohinta on korkea. Pääsääntöisesti kiinteistöjen lämpöpumppujärjestelmät ovat kuitenkin osatehokkaita paremman kokonaishyötysuhteen saamiseksi. Tällöin tilanteissa, joissa kaukolämmön hinta on korkea, on yleensä myös kiinteistössä suurin energiantarve ja joudutaan käyttämään lisälämmitystä (kaukolämpö, sähkö, öljy). Mikäli kiinteistöjen joustokykyä halutaan kasvattaa nykyisestä, tulee tämä huomioida jo uudis- ja korjausrakentamisessa lämmitysjärjestelmän mitoituksessa. Täysmitoitettussa tai ylimitoitettussa lämpöpumppujärjestelmässä investointihinta on suurempi.

## Liite 4. Älyohjaus 1

### 1. Kyselyn vastauspäivämäärä \*

4/19/2023

### 2. Mitä sidosryhmää edustat? \*

- Kaukolämmön tuottaja
- Kysynnänjousto-ohjelman tarjoaja
- Kiinteistöjohtaminen (Tilapa)

### 3. Mikä on kehittämänne palvelun pääperiaate lämmitysjärjestelmän ohjauksessa? Miten se eroaa esimerkiksi tavallisesta suuntaisierrolla toimivasta ohjauksesta? \*

Ohjaus perustuu aina sisäilmaolosuhteisiin, jonka perusteella lämmitykseen vaikuttavia ohjauspisteitä korjataan tarpeen mukaisesti. Palvelussa on erilaisiin toimintapoihin perustuvia ohjauksia:

- Sisälämpötilan optimointi. Tässä lämmitystä ohjataan kiinteistöihin asennettavien anturien mittauksien perusteella, ja haetaan optimaalista sisälämpötilaa.
- Sääennuste. Ohjelma huomioi sääennusteen lähimmän ilmatieteenlaitoksen mittauksen, jonka mukaan korjaa lämmityksen tarvetta ennakoon
- Huipputehojen optimointi. Ohjelma reagoi korkeisiin käyttövesipiikkeihin, jolloin lämmitystä lasketaan hetkellisesti. Maalämpökohteissa tarkastellaan seuraavan päivän SPOT-hintoja, jonka perusteella lämmitystä tehdään enemmän sähkön ollessa halpaa.
- Aikaperusteinen ohjaus. Lämmitystä tiputetaan palveluun tehtävän aikaohjelman perusteella tiettyinä kellonaikoina.
- Kaukolämmön kysynnänjousto-ohjaus. Kaukolämmön kysynnänjousto sopii suurempaan massaan kiinteistöjä, jolloin joustoa tarvittaessa kaikkien kiinteistöjen lämmityksen tarvetta vähennetään samanaikaisesti. Tällä tavoin kaukolämpöä tarvitsevat yritykset välttävät tuotantopiikkejä, sekä mahdollisten varavoimalaistosten käynnistämisen.

### 4. Perustuuko kehittämänne palvelu/ohjelma ennakoivaan, reaktiiviseen vai johonkin muuhun ohjaustapaan? \*

Ohjelma reagoi sääennusteisiin ja ohjaa tämän perusteella lämmitystä ennakoivasti. Huipputehojen optimointia tehdään reaktiivisesti, jolloin käyttöveden huipputehoikkien aikana lämmitystä lasketaan hetkellisesti.

### 5. Millaisten lämmitysjärjestelmien kohdalla ratkaisunne toimii ja onko näissä eroja? Onko siis lattialämmityksen, patteriverkoston tai ilmanvaihdon lämmitysten ohjauksessa eroavaisuuksia? \*

Lattialämmityksen ja patteriverkoston osalta ohjaukset toimivat samojen periaatteiden mukaan, joskin ohjauksen vaikuttamat muutokset näkyvät erilaisella aikavälillä. Ilmanvaihdon lämmityksen ohjauksessa ei ohjata IV-lämmitysverkostoa, vaan IV-koneen lämpötilan asetusarvoja. Tämä vaikuttaa IV-lämmitysverkoston käyttäytymiseen. Lisäksi IV-koneissa voidaan ohjata käyntitehoja muiden sisäilmamittausten, kuten CO2 arvojen perusteella.

More options for Responses

### 6. Minkälaisia haasteita näette kysynnänjousto-ohjelman käytössä eri rakennustyyppien kohdalla? Millaisten rakennustyyppien kohdalla koette, että kysynnänjousto-ohjelman avulla voidaan saavuttaa suurimmat säästöt rakennuksen lämmitysenergian kustannuksissa? \*

Suurimmat haasteet ovat kompleksisten rakennusten kanssa, jossa lämmitystä tehdään useilla eri tavoilla eri vaikutusalueille. Useasti näissä kohteissa on jo alkuperäisessä automaatiossa ristiriitoja ohjauksen kesken, jolloin niiden korjaaminen ohjelmallisesti ei välttämättä riitä. Rakennustyyppillä ei varsinaisesti ole säästöihin vaikutusta, suurimmat säästöt saavutetaan aina kiinteistöissä, joissa tiloja ylläpidetään tarpeettomasti. Hyvä säästöpotentiaali on myös kiinteistöissä, joissa on mahdollista pienentää lämmitystä käyttöaikojen ulkopuolella. Varsinaiseen kysynnänjousto-ohjelmaan sopivat parhaiten kiinteistöt, joilla on korkea lämmönvarauskapasiteetti, eivätkä kiinteistön käyttäjät huomaa pieniä vaihteluja sisälämpötiloissa. Tällaisia kiinteistöjä ovat usein kunnalliset kiinteistöt.

### 7. Vapaa sana. Jos teillä on mielessänne jokin asia rakennusten lämmitysjärjestelmiä ohjaavan kysynnänjouston osalta, niin tähän kohtaan voi kirjoittaa vapaassa muodossa mahdollisuuksista, haasteista ja erityisistä huomioista yms., joita haluatte nostaa esille.

Monesti kiinteistöissä törmätään ongelmaan, ettei verkosto ole tasapainossa. Koska palvelun ohjauksissa pääsääntöisesti vaikutetaan lämmitysverkoston arvoihin perustuen mittauksien keskiarvoon, verkoston tasapaino on tärkeää.

## Liite 5. Älyohjaus 2

### 1. Kyselyn vastauspäivämäärä \*

4/21/2023

### 2. Mitä sidosryhmää edustat? \*

- Kaukolämmön tuottaja
- Kysynnänjousto-ohjelman tarjoaja
- Kiinteistöjohtaminen (Tilapa)

### 3. Mikä on kehittämänne palvelun pääperiaate lämmitysjärjestelmän ohjauksessa? Miten se eroaa esimerkiksi tavallisesta suuntaisierrolla toimivasta ohjauksesta? \*

Ohjaus perustuu tilojen olosuhtemittauksiin (huonelämpötilojen keskiarvoon) sekä asiakkaan kiinteistölle määrittelemään olosuhteiden tavoitetasoon.

### 4. Perustuuko kehittämänne palvelu/ohjelma ennakoivaan, reaktiiviseen vai johonkin muuhun ohjaustapaan? \*

Ohjaus perustuu reaktiiviseen ohjaustapaan.

### 5. Millaisten lämmitysjärjestelmien kohdalla ratkaisunne toimii ja onko näissä eroja? Onko siis lattialämmityksen, patteriverkoston tai ilmanvaihdon lämmitysten ohjauksessa eroavaisuuksia? \*

Tällä hetkellä ohjaustapa on käytössä patteriverkoston ohjauksessa. IV-verkoston ohjaus on polotointivaiheessa tuotekehityksessä.

### 6. Minkälaisia haasteita näette kysynnänjousto-ohjelman käytössä eri rakennustyyppien kohdalla? Millaisten rakennustyyppien kohdalla koette, että kysynnänjousto-ohjelman avulla voidaan saavuttaa suurimmat säästöt rakennuksen lämmitysenergian kustannuksissa? \*

Tämä ohjaustapa soveltuu kaikkiin rakennustyyppiin. Previous Response tävän kattavat olosuhtemittaukset. Erityisen hyvin tämä sopii kiinteistöihin jotka ovat osavuorokausikäytössä, jolloin lämpötilatavoitteita voidaan muuttaa eri aikoina tilojen käyttötarkoituksen mukaan. (esim tavoitetta voidaan laskea yöksi, jos tilat eivät ole käytössä)

More options for Responses

### 7. Vapaa sana. Jos teillä on mielessänne jokin asia rakennusten lämmitysjärjestelmiä ohjaavan kysynnänjoustopalvelun osalta, niin tähän kohtaan voi kirjoittaa vapaassa muodossa mahdollisuuksista, haasteista ja erityisistä huomioista yms., joita haluatte nostaa esille.

[REDACTED] palvelussa on optio myös kysyntäjoustopalveluun, jolla voidaan leikata kiinteistön kaukolämmön tehohiippuja, mutta tämä palvelu ei ole käytössä Tampereen kaupungin kohteissa.

## Liite 6. Kaukolämmön tuottaja

1. Kyselyn vastauspäivämäärä \*

5/15/2023



2. Mitä sidosryhmää edustat? \*

- Kaukolämmön tuottaja
- Kysynnänjousto-ohjelman tarjoaja
- Kiinteistöjohtaminen (Tilapa)

3. Mikä on rakennusten lämmitysjärjestelmässä käytettävän kysynnänjoustop rooli tämän hetken kaukolämmön tuottamisessa? Tarjoaako rakennusten lämmitysjärjestelmissä käytettävä kysynnänjousto enemmän mahdollisuuksia vai haasteita kaukolämmön tuottajalle? \*

Tällä hetkellä rakennusten kysyntäjoustop rooli on melko pieni. Mielestäni kysyntäjousto tarjoaa ennen kaikkea mahdollisuuksia.

4. Kuinka suuri otanta teillä on kaukolämmön tuottajana rakennusten lämmityksessä käytetyn kysynnänjoustop vaikutuksesta kaukolämmön tuotantoon? Arvioitu rakennusten määrä ja vuodet käytöstä. \*

Ei ole.

5. Millaiseksi näet rakennuskohtaisen kysynnänjoustop roolin kaukolämmön tuottamiseen vaikuttavana tekijänä tulevaisuudessa? Uskotteko tämän esimerkiksi edesauttavan mahdollisten matalalämpöisten kaukolämpöverkkojen toimintaa? \*

Rooli tulee varmasti olemaan huomattava, koska kiinteistöjen kulutuksen/olosuhteiden kytkeminen osaksi tuotannon ja jakelun optimointia tulee olemaan kokonaistehokkuuden ja mm. tehonhallinnan kannalta tärkeässä roolissa.

6. Vapaa sana. Jos teillä on mielessänne jokin asia rakennusten lämmitysjärjestelmiä ohjaavan kysynnänjoustop osalta, niin tähän kohtaan voi kirjoittaa vapaassa muodossa mahdollisuuksista, haasteista ja erityisistä huomioista yms., joita haluatte nostaa esille.