



**SAVONIA**

OPINNÄYTETYÖ - AMMATTIKORKEAKOULUTUTKINTO  
TEKNIIKAN JA LIIKENTEEN ALA

# KYSYNNÄN JOUSTON PILOTOINTI KAUKOLÄMPÖVERKOSSA

TEKIJÄ/T: Tommi Nieminen

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala	
Koulutusohjelma/Tutkinto-ohjelma Energiatekniikan tutkinto-ohjelma	
Työn tekijä(t) Tommi Nieminen	
Työn nimi Kysynnän jouston pilotointi kaukolämpöverkossa	
Päiväys 5.4.2021	Sivumäärä/Liitteet 43
Ohjaaja(t) Teija Honkanen	
Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani(t) Alva-yhtiöt Oy	
Tiivistelmä <p>Alva-yhtiöt on asettanut tavoitteekseen, että sen energiantuotannosta on hiilineutraalia vähintään 80 % vuonna 2025 ja 100 % vuonna 2030. Näihin tavoitteisiin päästäkseen energiayhtiön on keksittävä uusia ratkaisuja hiilineutraalin lämmön tuottamiseen. Hyödyntämällä hukkalämpöjä, tarjoamalla asiakkaille hybridilämmitysratkaisuja tai kaukolämmön kysyntäjoustoja, on mahdollista päästä lähemmäksi hiilineutraaliustavoitteita.</p> <p>Opinnäytetyön tavoitteena oli tarkastella teknisesti ja taloudellisesti kestäviä ratkaisuja ja menetelmiä, jotta kaukolämmön kysyntäjoustoja voitaisiin toteuttaa laajemmassa mittakaavassa Alvan kaukolämpöverkossa. Lisäksi tavoitteena oli hyödyntää pilotissa saatuja kokemuksia ja tuloksia sekä ymmärtää, kuinka kaukolämmön kysyntäjoustoja tulisi Jyväskylässä jatkossa toteuttaa, jotta se palvelisi mahdollisimman hyvin niin asiakkaita kuin energiayhtiötä. Opinnäytetyössä pilotoitiin kaukolämmön kysyntäjoustoja neljän eri järjestelmätoimittajan ja viiden erilaisen kiinteistön kanssa.</p> <p>Työn tuloksena saatiin kiinteistökohtaiset arviot joustopotentialista eri ulkolämpötiloissa, joustettavana tehona sekä prosentuaalinen osuus hetkellisestä tehosta. Opinnäytetyöstä saa myös käsityksen siitä, millaiset olivat neljän eri järjestelmätoimittajan valmiudet toteuttaa kaukolämmön kysyntäjoustoja energiayhtiön ja asiakkaan kanssa. Kiinteistöjen joustaessa havaittiin kaukolämmön paluuveden lämpötiloissa nousua, etenkin niillä hetkillä, kun lämpimän käyttöveden kulutus on vähäistä. Negatiivisten joustojen vaikutusta havaittiin useassa kohteessa pilotin alkuvaiheessa, nämä onnistuttiin välttämään tekemällä muutoksia joustojen ohjaustapaan. Pilotissa saatuja tietoja ja tuloksia voidaan mahdollisesti hyödyntää tulevaisuudessa Alvan kehittäessä kaukolämmön kysyntäjoustoja kaupallista tuotetta.</p>	
Avainsanat Kaukolämpö, kysyntäjousto, pilotointi, energiankulutus, kaukolämpöteho	

Field of Study Technology, Communication and Transport			
Degree Programme Degree Programme in Energy Engineering			
Author(s) Tommi Nieminen			
Title of Thesis Demand Response Piloting in District Heating Network			
Date April 5, 2021		Pages/Appendices 43	
Supervisor(s) Teija Honkanen			
Client Organisation /Partners Alva-yhtiöt Oy			
<p><b>Abstract</b></p> <p>Alva-yhtiöt has set a target of at least 80% carbon neutral energy production in 2025 and 100% in 2030. In order to achieve these goals, the energy company will have to come up with new solutions for producing carbon-neutral heat. By utilizing waste heat, offering customers hybrid heating solutions or district heating demand response, it is possible to get closer to carbon neutrality targets.</p> <p>The aim of the thesis was to find technically and economically sustainable solutions and methods so that the demand response of district heat could be implemented on a larger scale in Alva's district heating network. Other aims were to utilize the experience and results of the pilot and understand how district heat demand response should be implemented in Jyväskylä in the follow-up in order to serve both customers and the energy company as well as possible. The thesis piloted demand response for district heating with four different system suppliers and five different properties.</p> <p>As a result of the thesis property-specific estimates of flexibility potential at different outdoor temperatures, flexible power and a percentage of instantaneous power were received. Also information on the capabilities of four different system suppliers to implement demand response for district heating with the energy company and the customers is contained in the study. During demand responses, an increase in the temperature of the return water for district heat was observed, especially at times when the consumption of hot domestic water is low. The impact of negative demand responses was observed in several locations in the early stages of the pilot, and these were avoided by making changes to demand response control. The information and results obtained in the pilot may be utilized in the future as Alva develops a commercial product for district heat demand response.</p>			
<p><b>Keywords</b> District heating, demand response, piloting, energy consumption, district heating power</p>			

## SISÄLTÖ

1	JOHDANTO .....	5
2	ALVA-YHTIÖT OY .....	6
2.1	Tytär- ja osakkuusyhtiöt .....	6
2.2	Voima- ja lämpölaitokset .....	7
3	KAUKOLÄMPÖ .....	9
3.1	Kaukolämpöjärjestelmä .....	9
3.1.1	Asiakaslaitteet.....	10
3.2	Kaukolämpö Suomessa.....	11
3.2.1	Kaukolämmön tuotanto ja kulutus .....	12
3.2.2	Kaukolämpöverkot .....	14
3.2.3	Kaukolämmön hinnoittelu .....	16
3.2.4	Kaukolämmön tulevaisuus .....	17
3.3	Kaukolämpö Jyväskylässä .....	18
4	KAUKOLÄMMÖN KYSYNTÄJOUSTO.....	19
4.1	Kysyntäjouaston hyödyt ja haitat .....	20
4.2	Kysyntäjouaston toteuttaminen .....	21
5	PILOTIN TOTEUS JA TULOKSET .....	23
5.1	Case 1: Kerrostalo.....	24
5.2	Case 2: Kerrostalo.....	29
5.3	Case 3: Päiväkotikoulu .....	33
5.4	Case 4: Yliopiston kampusalue.....	34
5.5	Case 5: Oppilaitoskiinteistöt A & B .....	37
6	YHTEENVETO.....	42
	LÄHDELUETTELO.....	44

## 1 JOHDANTO

Tulevaisuudessa energiantuotannon rakenne tulee muuttumaan merkittävästi. Useita muutostekijöitä onkin jo havaittu ja ne vaikuttavat energiajärjestelmien systeemijatteluun, tekniikkaan, merkitykseen ja liiketoimintamalleihin. Kaikista keskeisimmät muutostekijät liittyvät teknologioiden kehitykseen, hajautuvaan ja uusiutuvaan energiantuotantoon, digitalisaatioon, kaupungistumiseen ja kuluttajan roolin kasvamiseen. (Salokoski 2017, 6.)

Tulevaisuuden energiajärjestelmä tulee olemaan joustava ja älykäs. Energiantuotannon ohjauksen lisäksi energian kulutusta voidaan myös ohjata ja sovittaa yhteen kulloisenkin tuotantotilanteen mukaan. Eri tuotantomuotoja yhdistävät hybridijärjestelmät ovat yleistymässä. Kuluttajan rooli tulee myös tulevaisuudessa muuttumaan kysynnän jouston myötä. Aktiivinen kuluttaja voi olla samaan aikaan sekä energian kuluttaja, tuottaja että varastoija. Energian käyttöä voidaan tehostaa digitalisaation ja teollisen internetin avulla kaikilla sektoreilla niin rakennuksissa, liikenteessä kuin teollisuudessakin. Energiatehokkuudella voidaan vähentää kasvihuonekaasupäästöjä, ja kiertotalousajattelun myötä voidaan korostaa resurssien käytön tehokkuutta. Lisäksi se on myös kustannustehokasta. (Salokoski 2017, 6.)

Joustava ja kilpailukykyinen energiajärjestelmä koostuu monista eri tekijöistä, joista osaa ollaan vasta kehittämässä. Tulevaisuudessa kysynnän jousto tulee mahdolliseksi ja sen mekanismit kehittyvät edelleen merkittävästi. Muuttuvan energiajärjestelmän avulla saadaan myös uusia liiketoimintamalleja, erityisesti uutta palveluliiketoimintaa, joka ei ennen ole ollut mahdollista. (Salokoski 2017, 6.)

Opinnäytetyön toimeksiantajana toimi Alva-yhtiöt Oy, joka tavoittelee 80 % hiilineutraalia tuotantoa vuodelle 2025 ja kokonaan hiilivapaata tuotantoa vuodelle 2030. Näihin tavoitteisiin päästäkseen energiayhtiöiden on jatkuvasti etsittävä uusia ratkaisuja kaukolämmön tuotantoon. Yksi mahdollinen tapa vähentää hiilidioksidipäästöjä on leikata kaukolämmön kulutusta huipputehon aikaan niin, ettei öljykäyttöisiä varateholaitoksia tarvitsisi käynnistää.

Alvan kaukolämpöverkossa tunnistetut potentiaalisimmat kysyntäjouston hyödyntämistavat ovat fossiilisten polttoaineiden käytön minimointi, kaukolämpöverkon käytön optimointi, sähköntuotannon optimointi, häiriötilanteissa lämpimän käyttöveden turvaaminen ja huippukapasiteetin tarpeen vähentäminen. Alvan kaukolämpöverkossa tulisi olla joustettavaa tehoa vähintään 5–10 MW, jotta tuotannosta saatavia hyötyjä olisi odotettavissa.

## 2 ALVA-YHTIÖT OY

Jyväskylän kaupungin omistama Sähkölaitos perustettiin huhtikuussa 1902. Samana vuonna alkoi sähköntuotanto puulla Lutakon sähkötehtaassa ja ensimmäiset sähkövalot syttyivät Jyväskylän kaduille puoli vuotta yhtiön perustamisen jälkeen. Kaukolämmöntuotanto aloitettiin vuonna 1960. Toiminta muuttui vuonna 1980 Energialaitos-nimen myötä liikelaitokseksi ja vuonna 1997 Energialaitoksesta tehtiin osakeyhtiö, Jyväskylän Energia Oy. Jyväskylän kaupunki myi vuonna 2006 vesiliiketoimintansa Jyväskylän Energialle. Lokakuussa 2019 nimenmuutoksen myötä Jyväskylän Energiasta tuli Alva-yhtiöt Oy. (Alva 2019.)

Vuonna 2018 konsernin liikevaihto oli 210,3 miljoona euroa ja henkilöstömäärä 257. Sähköä siirtyi yhtiön jakeluverkkoa pitkin 669 GWh ja kaukolämmön myynti oli 1104 GWh. Energiantuotannosta n. 50 % tuotettiin uusiutuvilla energianlähteillä. Alvan tavoitteena on, että energiantuotannosta on CO<sub>2</sub>-vapaata vähintään 80 % vuonna 2025 ja 100 % vuonna 2030. (Alva 2019.)

### 2.1 Tytär- ja osakkuusyhtiöt

Jyväskylän kaupungin sataprosenttisesti omistama energiayhtiö Alva-yhtiöt Oy toimii konsernin emoyhtiönä. Tytäryhtiöiden kanssa Alva-yhtiöt tuottaa ja jakelee sähköä sekä tuottaa, myy ja jakelee lämpöä ja vettä omistamissaan verkoissaan.

Alvalla on kymmenen tytär- ja osakkuusyhtiötä. Jyväskylän kantakaupungin sähköverkonhaltijana toimii Alva Sähköverkko Oy, jonka tehtävänä on siirtää voimalaitoksissa tuotettu sähkö verkkoalueellaan oleville asiakkaille. Lisäksi toimintaan kuuluvat sähköverkon suunnittelu, rakentaminen, ylläpito ja käyttö, asiakkaiden liittäminen verkkoon ja muut sähkön siirtoon tarvittavat tehtävät. Jyväskylän Energiantuotanto Oy perustettiin vuonna 1996. Nykyisin yhtiö tuottaa sähköä, höyryä ja kaukolämpöä pääasiassa maakunnan omilla polttoaineilla, puulla ja turpeella. Kaukolämpö toimitetaan emoyhtiön sekä Elenia Oy:n omistamiin verkkoihin Jyväskylän alueella. Keljonlahden uuden biovoimalaitoksen toimintaa varten perustettiin vuonna 2006 Jyväskylän Voima Oy, josta Alva-yhtiöt omistaa 81,4 %. Voimalaitoksen rakentamistyöt alkoivat lokakuussa 2007 ja se vihittiin käyttöön kesällä 2011. JE Hulevesi Oy (100 %) perustettiin 2017. Viitasaaren kaupunginhallitus hyväksyi vuonna 2018 Wiitaseudun Energia Oy:n koko osakekannan myynnistä Jyväskylän Energialle. WSE Oy:n toimialoina ovat kaukolämmön tuotanto ja myynti, veden hankinta, myynti ja jakelu sekä jäteveden keräily ja puhdistus. Yhtiö jatkaa ensivaiheessa omana yhtiönä, osana Alva-konsernia. (Alva 2019.)

Osakkuusyhtiöitä ovat KS Energiavälitys Oy (44,66 %), joka on sähkön ja sähkölaitostarvikkeiden hankintayhteistyöhön perustettu yritys. Yrityksen omistaa Alva-yhtiöt Oy, Ääneseudun Energia Oy, Etelä-Savon Energian Oy ja Kuoreveden Sähkö Oy. C-Ella Oy (33,3 %) yrityksen omistaa Alva-yhtiöt Oy, Lahti Energia Oy sekä Oulun Sähkömyynti Oy, joka on asiakastietojärjestelmien kehitysyritys. Vuoden 2019 alusta toimintansa aloittanut energiapalveluyhtiö Väre Oy (20,3 %) on Alva-yhtiöt Oy:n, Savon Voima Oyj:n, Kuopio Energia Oy:n, ja Lappeenrannan Energia Oy:n perustama yritys,

joka vastaa osakasyhtiöiden sähkönmyynnistä. Jyväskylän Energia oli perustamassa vuonna 1998 Suomen Hyötytuuli Oy:tä (12,5 %), joka on yksi Suomen suurimmista tuulisähkön tuottajista. Näiden lisäksi Alva-yhtiöt Oy omistaa hankintayhtiö Sansia Oy:stä 0,8 % osuuden. (Alva 2019.)

## 2.2 Voima- ja lämpölaitokset

Jyväskylän alueen kaukolämpö tuotetaan pääasiassa kahdessa sähkön ja lämmön yhteistuotantolaitoksessa, Rauhalahden ja Keljonlahden voimalaitoksissa. Rauhalahden voimalaitos on vuonna 1986 valmistunut vastapainevoimalaitos. Polttoaineena käytetään puuta ja turvetta, kumpaakin keskimäärin noin 50 %. Pääkattilan kaukolämpöteho on 150 MW ja sähköteho 85 MW, lisäksi laitosalueella on kaksi apukattilaa. RAI2 öljykattila, jota käytetään tuottamaan apuhöyryä voimalaitokselle sen käynnistyksen alkuvaiheessa sekä RAI4 (40 MW) öljykattila, joka toimii vara- ja huippukuormakattilana. Syksyllä 2015 valmistui uusimman teollisuuspäästödirektiivin mukainen uudistyö, jonka myötä voimalaitoksen päästötasot laskevat entisestään. Asennetulla savukaasupesurilla saadaan savukaasuista energiaa talteen noin 3000 omakotitalon tyyppillisen tehon verran. (Alva 2019.)



KUVA 1. Rauhalahden voimalaitos (Alva 2019)

Uudempi vuonna 2010 valmistunut Keljonlahden voimalaitos voi tuottaa joko yhteistuotantona lämpöä ja sähköä, lauhdetuotantona pelkästään sähköä tai reduktioajossa vain lämpöä. Polttoaineen käytetään pääasiassa puuta ja apupolttoaineena turvetta, tukipolttoaineena toimivat hiili ja öljy. Voimalaitoksen kaukolämpöteho on 260 MW, sähköteho lauhdetuotannossa 215 MW ja sähköteho yhteistuotannossa 163 MW. (Jyväskylän Energia 2018, 40–41.)



KUVA 2. Keljonlahden voimalaitos (Jyväskylän Energia 2018)

Lisäksi Alvan kaukolämpöverkkoon on liitetty useampia lämpökeskuksia, jotka toimivat vara- ja huipputeholaitoksina. Nykyään on käytössä Savelan voimalaitoksen öljykäyttöiset A-kattilat, kaukolämpöteholtaan 2\*40 MW. Seppälänkankaan teollisuusalueella sijaitsevalla Varikon lämpökeskuksella otettiin käyttöön laajennuksen yhteydessä vuonna 2007 uudempi öljykattila, vanhemman jäädessään pois käytöstä. Varikko 2- kattilan kaukolämpöteho on 40 MW. Kuokkalan lämpökeskus on kattilalaitos, joka on rakennettu raskaalla polttoöljyllä vuonna 1989, kaukolämpöteholtaan 40 MW. Automaatiojärjestelmien uusinta laitokseen valmistui 2019. (Alva 2019.)

Savelan voimalaitosalueella on vanhasta öljysäiliöstä rakennettu paineistamaton kaukolämpöakku, jota voidaan käyttää kaukolämpötehon kuormienhallintaan. Jyväskylän Keltinmäessä sijaitsee yhtiön mikro-CHP- laitos, joka tuottaa läheiseltä kaatopaikalta siirtoputkea pitkin toimitettavasta biokaasusta sähköä ja lämpöä. (Alva 2019.)



### 3 KAUKOLÄMPÖ

#### 3.1 Kaukolämpöjärjestelmä

Kaukolämpö on laajojen alueiden, kuten kokonaisten kaupunkien tai niiden osien keskitetty lämmitysjärjestelmä, jota tyypillisesti käytetään rakennusten ja niiden käyttöveden lämmittämiseen. Kaukolämmöllä voidaan myös tuottaa teollisuuden tarvitsema lämpö esimerkiksi tuotantoprosesseja varten. (Mäkelä & Tuunanen 2015, 11.)

Lämpöenergia tuotetaan voimalaitoksissa tai lämpökeskuksissa ja sitä jaetaan asiakkaille kaukolämpöverkossa kiertävän kuuman veden avulla. Suomessa on tyypillisesti käytössä epäsuora kytkentätapa, jossa kaukolämpöverkosto on erotettu rakennuksen lämmitysverkostosta lämmönsiirtimillä. Kaukolämpöveden menolämpötila riippuu vuodenajasta ja tarvittavasta tehosta 65–115 °C välillä. Kesällä menolämpötila on alimmillaan, koska lämpöä tarvitaan ainoastaan käyttöveden lämmitykseen. Tarpeettoman korkea menolämpötila aiheuttaa turhia lämpöhäviöitä verkossa. Kuuma kaukolämpövesi pumpataan menoputkea pitkin asiakkaalle, jossa se jäähtyy ensin lämmönjakokeskuksen lämmönsiirtimissä, jonka jälkeen se luovuttaa lämpöenergian asiakkaan lämmitysjärjestelmiin kuten patteriverkkoon, ilmanvaihtoverkkoon ja lämpimän käyttöveden valmistukseen. Hygieniasyistä johtuen lämpötila tulee olla vähintään 58 °C. Asiakkaalta jäähtynyt kaukolämmön paluuvesi johdetaan kaukolämmön paluuputkessa takaisin tuotantolaitokselle uudelleen lämmitettäväksi ja se on lämpötilaltaan noin 40–60 °C. Kaukolämpövesi käsitellään poistamalla mekaanisia epäpuhtauksia ja happea. Lisäksi käsittelyllä ehkäistään putken sisäpuolista korroosiota ja usein kaukolämpövesi on värjätty mahdollisten vuotojen paikantamiseksi. (Mäkelä & Tuunanen 2015, 148.)

Kaukolämmityksen energiatehokkuus perustuu sähkön ja lämmön yhteistuotantoon (CHP, Combined Heat and Power). Yhteistuotannolle on ominaista sähkön erillistuotantoa huomattavasti korkeampi hyötysuhde. Erillistuotannossa tarkoituksena on vapauttaa sähkön tuotannosta jäljelle jäänyttä lämpöenergiaa käyttämättömänä ympäristöön. Yhteistuotannossa avulla lämpöenergia saadaan hyödynnettyä kaukolämpöverkoston lämmönsiirtimien avulla. Höyryn paisumista joudutaan kuitenkin turbiinissa hieman rajoittamaan ja silloin menetetään pieni osa sähköntuotannosta. Sähkön ja lämmön yhteistuotanto hyödyntää polttoaineesta saatavaa energiaa huomattavasti paremmin, jolloin häviöiden osuus jää pienemmäksi. (Mäkelä & Tuunanen 2015, 12–13.)

### 3.1.1 Asiakslaitteet

Kaukolämmön epäsuorassa kytkennässä asiakkaalla on aina oma lämmönjakokeskus, jossa kiinteistön lämmitysjärjestelmän vesi lämmitetään kaukolämpövedellä erillisissä lämmönsiirtimissä. Säätöteknisistä syistä on patteriverkkoa, lattialämmitystä, ilmastointia ja lämmintä käyttövetä varten yleensä erilliset lämmönsiirtimet. Lämmönjakokeskus sijoitetaan lämmönjakuhuoneeseen. (Koskelainen, Saarela & Sipilä 2006, 43.)

Tyypilliset asuinkiinteistöissä käytettävät lämmönjakokeskukset (kuva 3) valmistetaan tehdasvalmisteisina kokonaisuuksina, joihin kuuluu siirtimet, anturit, pumput, paisunta-astiat, säätimet, sähköohjauskeskukset, paine- ja lämpömittarit, tarvittavat venttiilit sekä varolaitteet. Asiakslaitteiden automaatiikka säätää lämmönsiirtimien läpi kulkevaa vesivirtaa kaukolämmön säätöventtiilin avulla niin, että se vastaa kiinteistön hetkellistä tehon tarvetta.



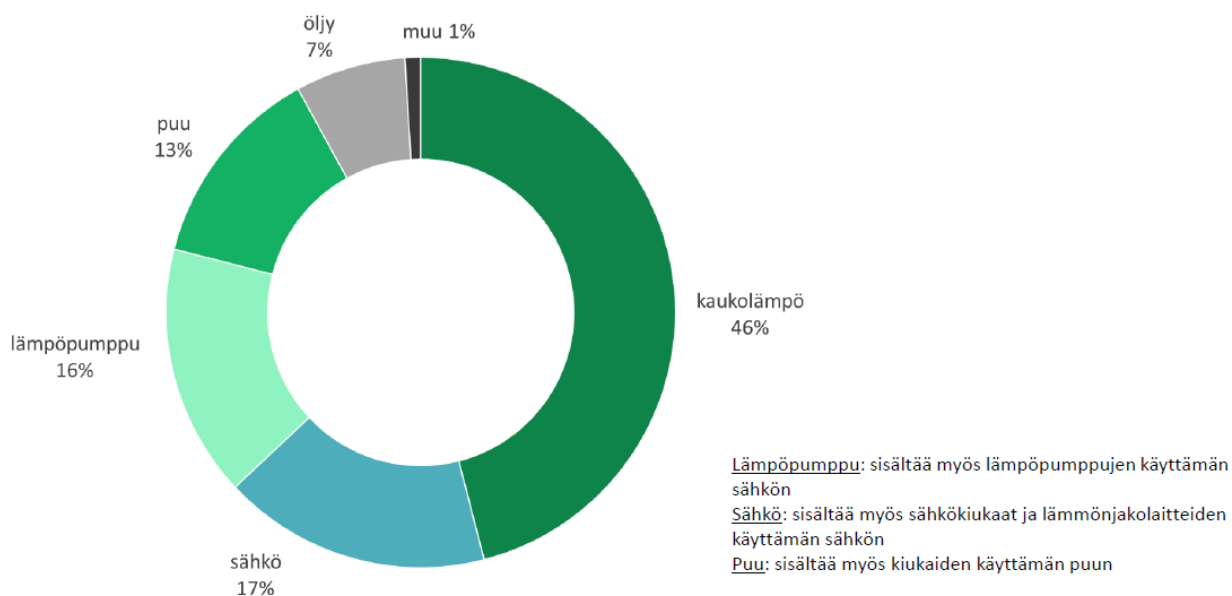
KUVA 3. Tyypillinen 3-piirinen kaukolämmön alajakokeskus (Nieminen 2020)

### 3.2 Kaukolämpö Suomessa

Suomen rakennuskannan lämmitystarve on suuri ilmastollisista syistä johtuen. Suomessa yleisin lämmitysmuoto on kaukolämpö. Kaukolämmön rakentaminen on aloitettu Suomessa viime vuosisadan puolivälissä, ja kaukolämpöjärjestelmiin on panostettu jo monien vuosikymmenten ajan. Kaukolämmön asiakkaiden lukumäärä, johtopituus, tuotantokapasiteetti ja liittymistehot on ollut nousujohteista tähän päivään saakka. Suurimmissa kaupungeissa kaukolämmön markkinaosuus yltää jopa yli 90 prosenttiin. Tyypillisesti sähkön ja lämmön yhteistuotannolla tuotetaan keskimäärin kolme neljänestä Suomen kaukolämmöstä. (Pöyry 2018, 10, 4–5.)

Kaukolämmön etuina ovat sähkön ja lämmön yhteistuotannon hyvä hyötysuhde, toimintavarmuus ja käyttäjäystävällisyys. Suomessa lämmitysenergiasta merkittävin osa käytetään asuintalojen lämmitykseen. Toiseksi merkittävimmän kulutusryhmän muodostavat julkiset ja kaupalliset rakennukset. Vuonna 2016 Suomessa käytettiin lämpötilakorjattuna lämmitysenergiaa noin 96 TWh, josta kaukolämmön osuus on 36 TWh. Lämpötilakorjattu kulutus saadaan, kun se normeerataan lämmitystarvelukujen avulla. Näin ollen eri vuosien kulutukset ovat vertailukelpoisia.

Kaukolämmitettyjen asuntojen asukasluku oli yhteensä 2,92 miljoona henkilöä ja rakennustilavuus 993 milj.m<sup>3</sup>. Vuonna 2018 lämpötilakorjattu ominaislämmönkulutus kaukolämmitteisissä rakennuksissa oli 36,2 kWh/m<sup>3</sup> (119,4 kWh/m<sup>2</sup>). Kuvassa 4 näkyy asuin- ja palvelurakennusten lämmitysten markkinaosuudet Suomessa vuodelta 2018. (Energiateollisuus 2018.)

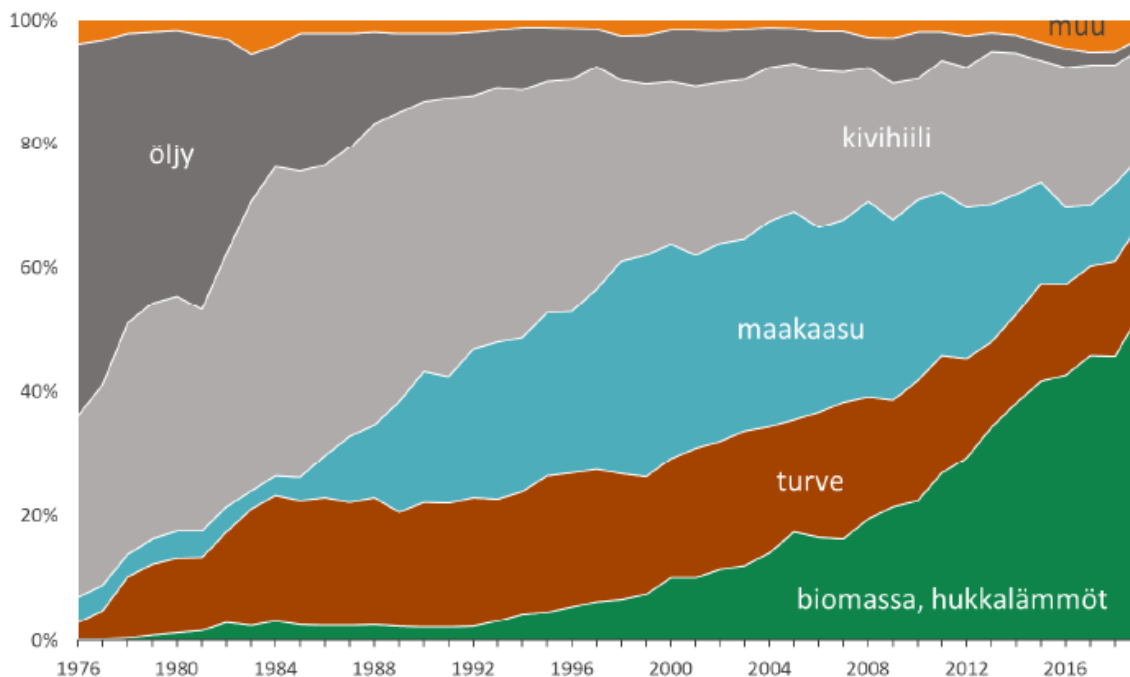


KUVA 4. Lämmityksen markkinaosuudet (Tilastokeskus 2018)

### 3.2.1 Kaukolämmön tuotanto ja kulutus

Suomessa kaukolämmön tuotanto ja sen liittymistehot ovat kasvaneet siitä asti, kun kaukolämpöä on kehitetty. Kaukolämmityksen paras hyötysuhde saavutetaan, kun kaukolämpö tuotetaan sähkön ja lämmön yhteistuotantolaitoksissa. Tämän avulla voidaan säästää keskimäärin jopa kolmannes polttoaineiden kulutuksessa verrattuna sähkön ja lämmön erillistuotantoon. Yhteistuotannon osuus on tyypillisesti suurempi suurissa kaupungeissa. Yhteistuotantolaitosten rakentaminen ei ole välttämättä aina taloudellisesti kannattavaa ja tuotanto perustuu lämmön erillistuotantoon. Lisäksi lämmön erillistuotantoa tarvitaan kylmän sään aikaan tuottamaan kaukolämmön huippukuormaa sekä toimimaan varakapasiteettina peruskuormalaitosten ja jakeluverkon häiriötilanteita varten. (Pöyry 2011, 5.)

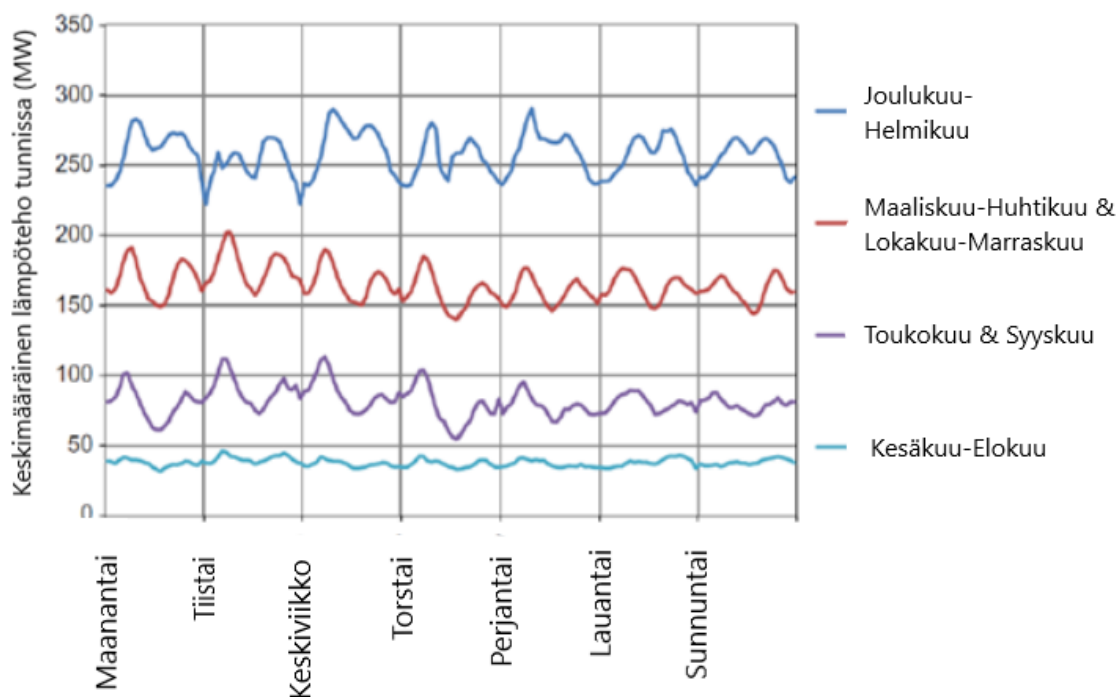
Suomessa valtaosa kaukolämmöstä tuotetaan puupolttoaineilla, turpeella sekä kivihiilellä. Vuonna 2019 kaukolämmön tuotannosta puupolttoaineiden osuus oli 33 %, kivihiilen 18 % ja turpeen 14 %. Savukaasupesureilla ja muulla hukkalämmöillä tuotetun kaukolämmön osuus oli 10 %. Hukkalämmön osuus onkin kasvanut merkittävästi viime vuosina. 2009 sen osuus tuotetusta kaukolämmöstä oli vain 2,5 %. Kaukolämmön kokonaistuotanto oli 38,5 TWh, josta lämmön ja sähkön tuotannon osuus oli 24,7 TWh ja erillistuotannon 13,8 TWh. (Energiateollisuus 2019.)



KUVA 5. Kaukolämmön energianlähteet Suomessa 2019 (Energiateollisuus 2019)

Kaukolämmön kulutus vaihtelee arkipäivisin normaaleiden virka- aikojen mukaan, viikko- ja päivärytmin mukaan sekä vuoden ajan vaihteluiden mukaan. Vuositason vaihteluun vaikuttavat säätilojen sekä ulkolämpötilan vaihtelut. Viikko- ja päivärytmien vaihtelut aiheutuvat kaukolämpökiinteistöissä ihmisten toiminnasta sekä siihen vaikuttaa rakennuskohtaiset energiatehokkuustoimet. (Valor Partners 2015, 9.)

Taloudellisesti kannattavaa kaukolämpötoimintaa on peruslämmön tuottaminen ja toimittaminen. Huippulämmön toimittaminen on usein tappiollista ja parhaimmillaan nollakatteista. Nopeista kulutuksen vaihteluista voi aiheutua lisäkustannuksia kaukolämpöjärjestelmälle ja vähentävät sen tehokkuutta. Tehokkaan kaukolämpöjärjestelmän ominaisuuksiin kuuluu joustava tuotantorakenne sekä kysynnänjouston kaltaisia järjestelyjä, joilla kulutuksen vaihteluun vastataan. (Valor Partners 2015, 11.)



KUVA 6. Tuntitason lämmöntarpeen keskiarvo eri vuodenaikoina ruotsalaisessa kaukolämpöjärjestelmässä, jonka vuosittainen lämmöntuotanto on 1200 GWh (Gadd & Werner 2013b)

### 3.2.2 Kaukolämpöverkot

Suomessa kaukolämmityksen varhaisessa vaiheessa lämpö jaettiin asiakkaalle kuuman vesihöyryn avulla. Nykyään on yleisesti käytössä kaukolämmityksessä kaksiputkijärjestelmä, jossa kiertävän kuuman veden avulla lämpöenergia toimitetaan asiakkaan lämmönjakokeskukseen.

Kaukolämpöverkko on tärkeä osa koko kaukolämpöjärjestelmää, sillä se mahdollistaa lopulta lämmöntuotannon yhteen tai useampaan lämmöntuotantolaitokseen. (Mäkelä & Tuunanen 2015, 11.)

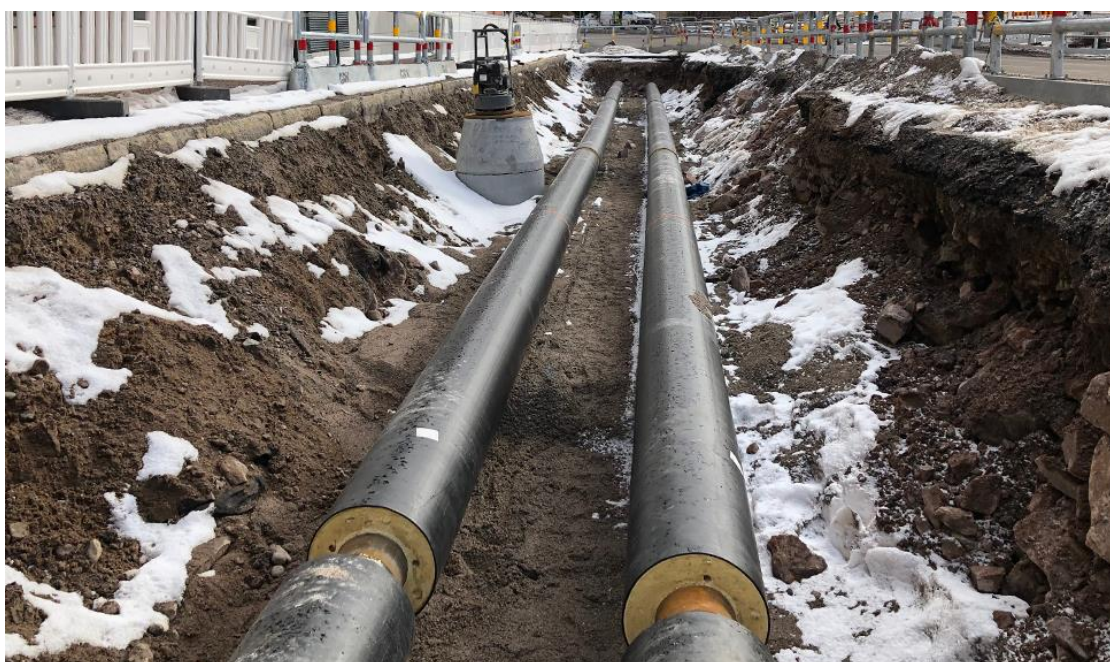
1960- luvun puolivälistä noin 20 vuoden ajan kaukolämpöjohtorakentamisessa käytettiin yleisesti muovisuojakuorellista johtotyyppiä, jossa virtausputket pääsivät vapaasti liikkumaan lämpöliikkeen vaikutuksesta lasikuituisen suojaputken sisällä. Huonoina puolina johtotyypistä voidaan mainita, suojaputken rikkoutumisesta mahdollisesti johtuva virtausputken korrosio laajenee koko kaivoväliin, liitosrakenne on arka maaperän liikkeille eikä eri valmistajien elementit ole yhteensopivia. Mpul-johtotyypin huonojen ominaisuuksien takia, sitä ei ole enää asennettu vuoden 1990 jälkeen. (Koskelainen ym. 2006, 145.)

Betonikanavajohtoja ei 1990- luvun alun jälkeen ole enää rakennettu. Maassa on kuitenkin runsaasti erityyppisiä betonikanavajohtoja, joissa virtausputkina toimivat teräsputket on sijoitettu betonikuoren sisään kannakkeiden varaan. Aikaisemmin kaikki suurimmat johdot olivat tätä rakennetta. Rakenteeseen kuuluvat ylä- ja alaelementti, virtausputket ja lämpöeriste.

Lämpölaajenemisesta johtuva liike ohjataan ohjausosilla kanavarakenteen suuntaiseksi.

Virtausputkien lämpöeristeenä käytetään usein mineraalivillaa. Eristeen ja betonikanavan väliin jää ilmatila, joka mahdollistaa kanavarakenteen tuuletuksen ja kanavaan päässeen veden poistumisen.

(Mäkelä & Tuunanen 2015, 60.)

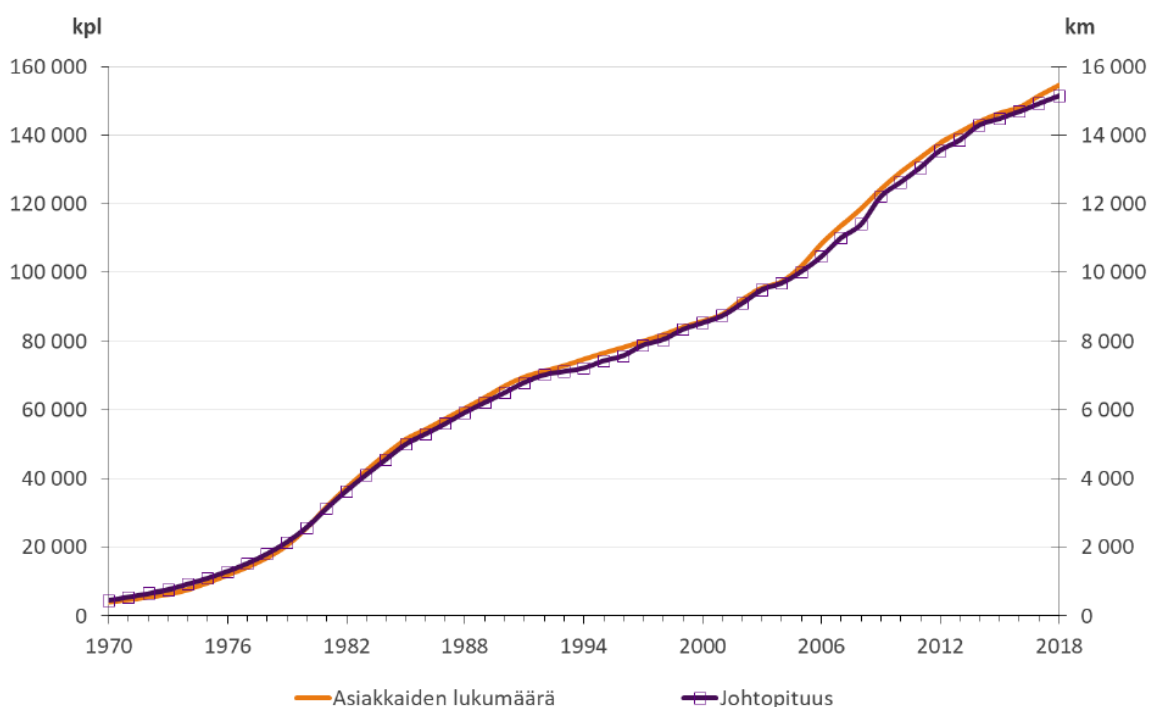


KUVA 7. 2Mpuk- kaukolämpöjohto kaivannossa (GRK 2021)



Nykyään valtaosin kaukolämpöverkostot rakennetaan tehdasvalmisteisista kaukolämpöelementeistä ns. kiinnivaahdotetuista johdoista, jotka sisältävät teräksisen virtausputken, lämpöeristeen ja suojakuoren. Eristeenä käytetään useimmiten polyuretaania ja suojakuorena polyeteeniä. Kiinnivaahdotettu johtotyyppi on otettu Suomessa käyttöön 1970-luvun puolivälissä ja se onkin syrjäyttänyt nopeasti muut käytössä olleet johtotyypit. 1980-luvun puolivälin jälkeen käytännössä kaikki kaukolämpöjohdot on rakennettu tällä johtotyypillä. Kiinnivaahdotetun johdon hyvinä puolina nähdään mm. laaja osavaliokoma tehdasvalmisteisia osia liitostarvikkeineen, elementin käsiteltävyys sekä eri valmistajien elementtien yhteensopivuus. Kiinnivaahdotettuja rakenteita on kahta erilaista. Mpuk-rakenteeseen kuuluu sekä meno- ja paluupuolen virtausputket sekä yhteinen muovisuojakuori, joka on liitetty polyuretaanieristeellä kiinteästi yhteen. 2Mpuk-rakenteessa (kuva 7) on erilliset meno- ja paluujohdot, joissa virtausputki ja muovisuojakuori polyuretaanieristeellä kiinteästi yhteen. (Koskelainen ym. 2006, 138–139.)

Suomessa kaukolämpöverkkojen yhteenlaskettu pituus oli vuonna 2018 noin 15140 kilometriä, joista nykyaikaista kiinnivaahdotettua rakennetta noin 80 %. Uuden kaukolämpöverkon rakentaminen on viime vuosina vaihdellut 150...600 km/v ja vastaavasti johtojen perusparantaminen on ollut 30...90 km/v tasolla. (Energiateollisuus 2019.)



KUVA 8. Kaukolämmön johtopituuden kehitys ja asiakkaiden määrä 1970-luvulta (Energiateollisuus 2019)

Kaukolämpöverkon virtausta ei varsinaisesti mitata, vaan sitä säädetään paineron avulla. Kaukolämpöverkossa on paineenkorotuspumppaamoita, joiden avulla varmistetaan verkon riittävä painetaso ja virtaus. Verkoston painetason tulee olla riittävän korkea, jotta vesi ei höyrysty. Asiakkaalle taataan riittävä lämmönsaanti pitämällä meno- ja paluuputken painero yli 0,6 bar:issa (Koskelainen ym. 2006, 338–340.)

Kaukolämpöverkon varrella on kaivoja, jotka ovat rakennettu verkon käyttöä varten. Kaukolämpökaivoissa on sulkuventtiileitä, joilla suljetaan ja erotellaan jakelualueita. Lisäksi kaivoihin on asennettu venttiileitä, joiden avulla tyhjenetään ja täytetään putkia sekä poistetaan ilmaa. Myös erilaisia säätö- ja mittalaitteita on sijoitettu kaivoihin, pumppaamoihin ja lämmönjakokeskuksiin. (Koskelainen ym. 2006, 146–147.)

### 3.2.3 Kaukolämmön hinnoittelu

Suomessa käytetään yleisesti kaukolämmön hinnoittelujärjestelmää, joka jakaantuu yleensä liittymismaksuun, perusmaksuun ja energiamaksuun. Liittymismaksu peritään asiakkaalta liittyessä kaukolämpöverkkoon. Liittymismaksulla katetaan kaukolämmön tuotanto- ja verkkoinvestointien pääomakustannuksia (Koskelainen ym. 2006, 470). Rakennusten lämmityslaitteet mitoitetaan siten, että lämpöolot voidaan ylläpitää lämmityskauden mitoitettavilla ulkolämpötiloilla, joka on ympäristöministeriön rakentamismääräys. Asiakkaan kanssa tulee sopia yksilöllinen, rakennuksen tehontarpeeseen perustuva kaukolämmön sopimusteho tai sopimusvesivirta. Tämän perusteella määräytyy liittymismaksu ja se kirjataan lämpösopimukseen. (Energiateollisuus 2014, 2.)

Kaukolämpöverkkoon liittyttyään asiakas maksaa yleensä liittymistehoon tai -vesivirtaan sidottua perusmaksua, jolla katetaan kaukolämpötoiminnan kiinteitä kustannuksia. Perusmaksun hinnoittelu määräytyy asiakkaan laskutusvesivirran tai -tehon perusteella. Laskutusvesivirta määritetään asiakkaan tehontarpeen ja kaukolämpöveden jäähtymän perusteella. Kaukolämpöveden jäähtymä on energiankulutuksen rinnalla merkittävä tekijä ja sen käyttäytymistä ohjataan hinnoittelun avulla. Uusien asiakkaiden laskutusteho määritetään laaditun kaukolämpösuunnitelman mukaisesti, ja olemassa olevien asiakkaiden laskutusvesivirta ja -teho tarkistetaan mittausten avulla. (Mäkelä & Tuunanen 2015, 122.)

Kaukolämmön tuntimittauksen avulla saadaan tuntikohtainen hinnoittelu ja niiden perusteella määräytyy laskutus. Tämän avulla voidaan todeta, että todellisia kannustimia voidaan luoda ja toiminnan vaikutukset voidaan todentaa tuntitasolla. Kysyntäjoustopalkitseminen voidaankin käytännössä rakentaa kaukolämmön hinnoittelumalleihin tulevaisuudessa. (Pesola, Bröckl & Vanhanen 2011, 33.)



Jos hinnoittelumalleja otetaan käyttöön, asiakkaiden tulee saada niiden avulla taloudellisia kannustimia, jotta motivaatio kysyntäjoustoihin syntyy. Tariffialennukset ja kompensatiomaksut voisivat toimia kannustimena kysyntäjoustopotentiaaliaan tarjoavalla asiakkaalla. (Pesola ym. 2011, 33.)

### 3.2.4 Kaukolämmön tulevaisuus

Kaukolämmön toimintaympäristössä tulee tapahtumaan suuria muutoksia tulevaisuudessa, joilla on odotettavasti vaikutusta kaukolämmön kilpailukykyyn. Kilpailukykyyn voi vaikuttaa esimerkiksi uudistuvat rakentamismääräykset ja erityisesti rakennusten ominaisenergiankulutus, polttoaineiden hintakehitys sekä poliittiset ohjauskeinot. (Pöyry 2011, 2.)

Kaukolämmön myynti on kasvanut jatkuvasti vuosikymmenten ajan. Myynnin määrällisen kasvun kuitenkin odotetaan pysähtyvän ja kääntymään laskuun vuoteen 2030 mennessä, johtuen rakennuskannan uusiutumisesta, energiatehokkuuden kehittymisestä ja ilmaston lämpenemisestä. (Energiateollisuus ry, 2013, 4) Lämmitysmarkkinoiden kilpailu on kasvanut entisestään ja erityisesti maalämpö ja erilaiset hybridijärjestelmät ovat yleistyneet. Kaukolämmön suurimmaksi haastajaksi on viime vuosina noussut maalämpö. (Työ- ja elinkeinoministeriö 2017, 47–48.)

Tulevaisuudessa kaukolämmön energianlähteinä voidaan hyödyntää suuria lämpöpumppuja, matalalämpöistä jätelämpöä, aurinkolämpöä sekä teollisuuden jätelämpöä. Myös täysin uudella tavalla, kuten geotermisellä energialla voidaan tuoda uusia mahdollisuuksia kaukolämmön tuotantoon. (Työ- ja elinkeinoministeriö 2017, 100.)



KUVA 9. Älykäs kaupunkienergiajärjestelmä (Pöyry 2018)

Energiateollisuuden Älykäs kaupunkienergia- hankkeen visio (kuva 9) tulevaisuuden sähkö-, kaukolämpö-, kaukojäähdytys- ja kaasujärjestelmien integroinnista, joiden avulla pyritään löytämään kustannustehokkaita ratkaisuja ilmastoon ja ympäristöön liittyvien tavoitteiden saavuttamiseksi.

### 3.3 Kaukolämpö Jyväskylässä

Jyväskylässä kaukolämpöverkkoon tuotetaan lämpöä pääasiassa lämmön ja sähkön yhteistuotantona Rauhalahden sekä Keljonlahden voimalaitoksissa, pääpolttoaineinaan puu ja turve. Rauhalahden voimalaitoksen lämmöntuotantotehon minimi on talviaikaan 50 MW ja maksimiteho savukaasupesurin lämmöntalteenoton asennuksen jälkeen 160–170 MW. Keljonlahden voimalaitoksen minimi on talviaikaan 130 MW ja maksimiteho 260 MW. Eri puolille verkkoa on liitetty useampia öljykäyttöisiä lämpökeskuksia, joita käytetään huippu- sekä varavoimalaitoksina. Jyväskylän Keltinmäessä on vuodesta 2003 saakka poltettu läheiseltä kaatopaikalta pääosin metaanista koostuvaa biokaasua lämmöksi. Samaisella tontilla sijaitsee nykyään mikro-CHP- laitos, jolla biokaasusta voidaan tuottaa sähköä, että lämpöä. (Alva 2019.)

Verkkoon on kytketty tilavuudeltaan noin 10 000 m<sup>3</sup> paineistamaton kaukolämpöakku, jota voidaan käyttää lämpövarastona. Lämpöä voidaan varastoida esimerkiksi yöllä, jolloin käyttöveden tarve on pienempi asiakkailta. Akkuun varastoitunut lämpöenergia voidaan hyödyntää pakkasaamuina, kun kulutus on suurempi. Lämpöakku parantaa energiantuotannon tehokkuutta sekä kaukolämmön toimitusvarmuutta asiakkaalle, verkon vuototilanteessa akusta voidaan pumpata lisävettä kaukolämpöverkkoon pitääkseen voimalaitokset tuotannossa sen aikaa, kun vuotolinja saadaan erotettua. Kaukolämpöakun lataus-/ purkausteho on 35 MW ja sen tehollinen varastoimiskyky on noin 450 MWh. (Alva 2019.)

Alvan omistama kaukolämpöverkko Jyväskylän alueella koostuu neljästä erillisverkosta. Pääverkko ylittää pohjoispäässä Palokan alueelle ja Etelässä verkko ulottuu Säynätsaloon saakka. Vuonna 2018 pääverkon pituus Jyväskylän alueella oli 482 km, lisäksi Korpilahdella, Tikkakoskella ja Viitasaarella on omat kaukolämpöverkkonsa, joihin lämpö tuotetaan paikallisesti. Pääverkon vesitilavuus on ilman kaukolämpöakkua noin 25 000 m<sup>3</sup>. Vuonna 2018 kaukolämmön käyttöpaikkoja oli kaikkiaan 4943 kpl ja verkkojen piirissä olevien asukkaiden määrä on noin 100 000 asukasta. Jyväskylän alueella lämpöä jakelee myös Loimua Oy, joka ostaa lämmön pääasiassa Alvalta. (Jyväskylän Energia 2018, 24)

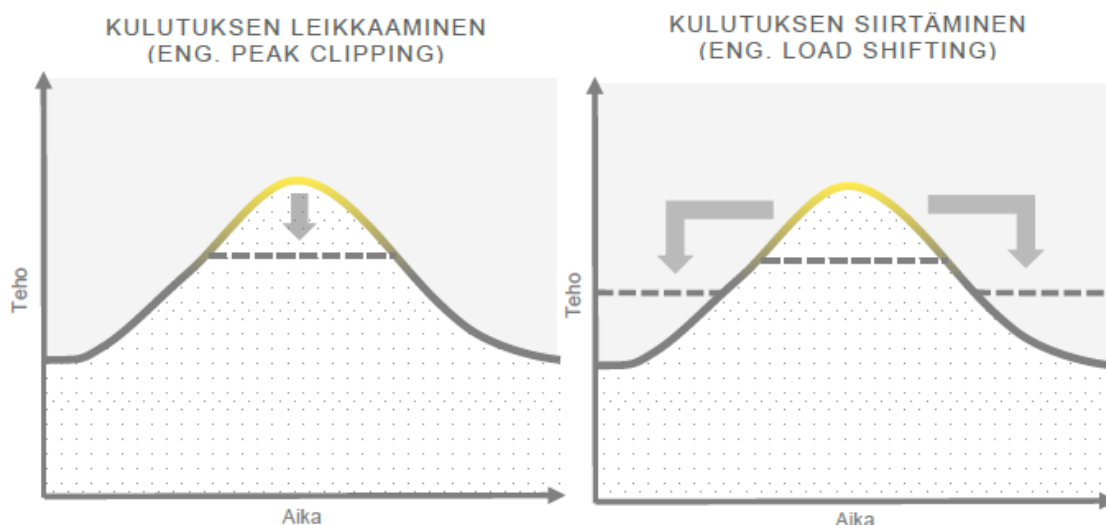
Pääverkon alueen korkeuserojen ja pitkien välimatkojen vuoksi, verkon alueelle on rakennettu kahdeksan paineenkorotuspumppaamoja sekä seitsemän kaivopumppua, joiden tehtävä on tuottaa riittävä paine-ero ja painetaso pumppaamon vaikutusalueelle.

#### 4 KAUKOLÄMMÖN KYSYNTÄJOUSTO

Kaukolämmön kulutuksen ohjauksen tavoitteena on energiantuotannon taloudellisuuden parantaminen ja ympäristöhaittojen ehkäiseminen. Kyseistä tavoitetta kutsutaan kysynnän hallinnaksi (Demand side management, DSM) tarkoittaen perinteisesti niitä keinoja, joilla energiayhtiö pyrkii vaikuttamaan asiakkaan energiankäyttöön siten, että käyttö on kokonaisuuden kannalta järkevää. Tällöin voidaan vaikuttaa sekä energiankäytön tasoon että ajalliseen käyttäytymiseen. (Koskelainen ym. 2006, 101.)

Kaukolämmön kysyntäjousto (Demand response, DR) voidaan määritellä kaukolämmön kulutuksen ja sitä kautta lämpötehon tarpeen ajoituksen muuttamista tavanomaiseen lämmitystarpeeseen verrattuna heikentämättä asiakkaiden kokemaa palvelun laatua. Kysyntäjousto ei tule sekoittaa perinteisiin energiantehokkuustoimiin, energian säästöön tai energian kysynnän rajoituksiin vaan kysyntäjouston tavoitteena on lämmönkulutuksen ajallinen siirto koko kaukolämpöjärjestelmän kannalta optimaalisemmaksi. Kysyntäjouston tavoitteena on yleensä loiventaa kulutushuippuja kalliin huipputuotannon vähentämiseksi tai välttämiseksi (kuva 10). Tämä lähtökohtaisesti parantaa energiantuotannon taloudellisuutta ja vähentää ympäristöhaittoja. (Valor Partners 2015, 3.)

Lähtökohtana kaukolämmön kysyntäjoustopissa on saada merkittävää hyötyä jossain osassa järjestelmää investointien tai käyttötoiminnan avulla syntyvinä selkeinä rahallisina säästöinä, joita voidaan jakaa kaukolämpöyhtiön ja asiakkaiden kesken. Toisin sanoen yksittäisten kiinteistöjen tekemistä toimenpiteistä ei ole hyötyä, jolleivät ne johda hyötyihin järjestelmätasolla esimerkiksi energiantuotannossa. Jos näin ei tapahdu, saattaa muutamien yksittäisten kiinteistöjen saama säästö kaatua muiden asiakkaiden maksettavaksi. Edellytyksenä toimivalle kysyntäjoustopille on, että syntyvä lisäarvo pystytään jakamaan siihen osallistuvien kesken panosten suhteessa. (Valor Partners 2015, 3.)



KUVA 10. Kaukolämmön kysyntäjoustop keskeiset menetelmät (Holmqvist 2018)

#### 4.1 Kysyntäjouaston hyödyt ja haitat

Kysyntäjouaston hyötyjä ja potentiaalia tarkasteltaessa on huomioitava, että kaukolämpöjärjestelmät eroavat toisistaan huomattavasti tuotantorakenteen, lämpöverkon rakenteen, kulutusprofiilin ja lämmön varastointikyvyn suhteen. Näistä syistä kysyntäjouaston hyötyjä tai toteutusmallia ei voida yleistää koskemaan kaikkia kaukolämpöjärjestelmiä – ja tämä pätee myös kysyntäjouaston toteutusmalliin. Suurin potentiaali on verkoissa, joissa perus- ja huipputuotannon hintaero on suuri ja tuotantolaitokset on mitoitettu kuorman suhteen niukasti. Ajallisesti kysyntäjouaston hyötypotentiaali on suurin keväisin, syksyisin sekä sellaisina talvipäivinä kun vuorokauden lämpötilan vaihtelut ovat suuria. (Valor Partners 2015, 3.)

Energiäteollisuuden toimeksi antaman tutkimuksen mukaan vuonna 2015 valmistuneessa raportissa energiayhtiöiden haastattelujen perusteella on tunnistettu kysyntäjouaston hyötyjä kaukolämpöyhtiöiden, asiakkaiden ja yhteiskunnan näkökulmasta. (Valor Partners 2015, 15.)

##### Kaukolämmön tuotanto

- Peruskuormavoimalaitosten käyttöastetta ja käyntiaikaa saadaan parannettua
- Huippulämpökusten ja muiden kustannukseltaan peruskuormalaitoksia kalliimpien voimalaitosten käyttöaikaa saadaan lyhennettyä, mutta toisaalta käyttöastetta parannettua
- Uusia tuotantoinvestointeja voidaan lykätä tai toteuttaa kevyempinä (jos investoija voi luottaa kysyntäjoustoihin)
- CHP-laitoksilla tuotettu sähkö saadaan ajoitettua kalliimman sähkön aikoihin
- Lämpöpumppujen tai sähkökattiloiden käyttö saadaan ajoitettua edullisemman sähkön aikoihin

##### Kaukolämpöverkko

- Pumppausenergian ja/tai -tehon tarpeen aleneminen
- Verkostoinvestointien lykkääminen tai mitoituksen keventäminen
- Järjestelmätason energiatehokkuuden paraneminen

##### Kaukolämpöasiakkaat

- Alhaisemmat kiinteät tehomaksut, jos ne perustuvat mitattuun todelliseen tehontarpeeseen, ja sitä saadaan alennettua
- Alhaisemmat energiakustannukset, jos tariffimalli palkitsee energiankäytön siirtämisestä edullisemman lämmön hinnan ajankohtiin
- Kuluttajapalveluiden kehittyminen uusien hinnoittelu- ja liiketoimintamallien kautta

## Yhteiskunta

- Energiantuotannon ympäristöystävällisyyden edistäminen
- Mahdollinen yleinen energiansäästö
- Mahdollisten vientikelpoisten ratkaisujen kehittäminen

Raportissa haastattelujen ja konsultin analyysin perusteella voidaan kysyntäjoustopon haittoina esittää seuraavat asiat: (Valor Partners 2015, 15–16.)

- Huonosti rakennettu kysyntäjoustopon toteutusmalli voi johtaa siihen, että lämpötehopiikki kasvaa entistä suuremmaksi ja siirtyy vain eri ajankohtaan. Tähän päädytään, jos kysyntäjoustopon on laajasti käytössä ja kaikkia kiinteistöjä ohjataan samalla tavalla.
- Mahdollisesti etukäteen sovittu kannustin asiakkaille saattaa johtaa tappioihin kaukolämpöyhtiöille, jos oletetut hyödyt eivät konkretisoidukaan.
- Liian voimakas ohjaus voi heikentää asiakastyytyväisyyttä, jos se toteutetaan kaukolämpöyhtiön suorana ohjauksena.

## 4.2 Kysyntäjoustopon toteuttaminen

Asuinrakennuksen lämmöntarpeeseen vaikuttavat erityisesti ympäristötekijät, rakennukseen liittyvät tekijät ja asukkaista riippuvat tekijät. Useimmissa tutkimuksissa keskeisimmiksi tekijöiksi on noussut ulkolämpötila, rakennustyyppi, huoneistotyyppi, rakennuksen eristys, lämmönsäädön menetelmä, asukkaan ikä, vuorokauden aika ja se asutaanko rakennuksessa vai ei. (Manninen 2014, 47.)

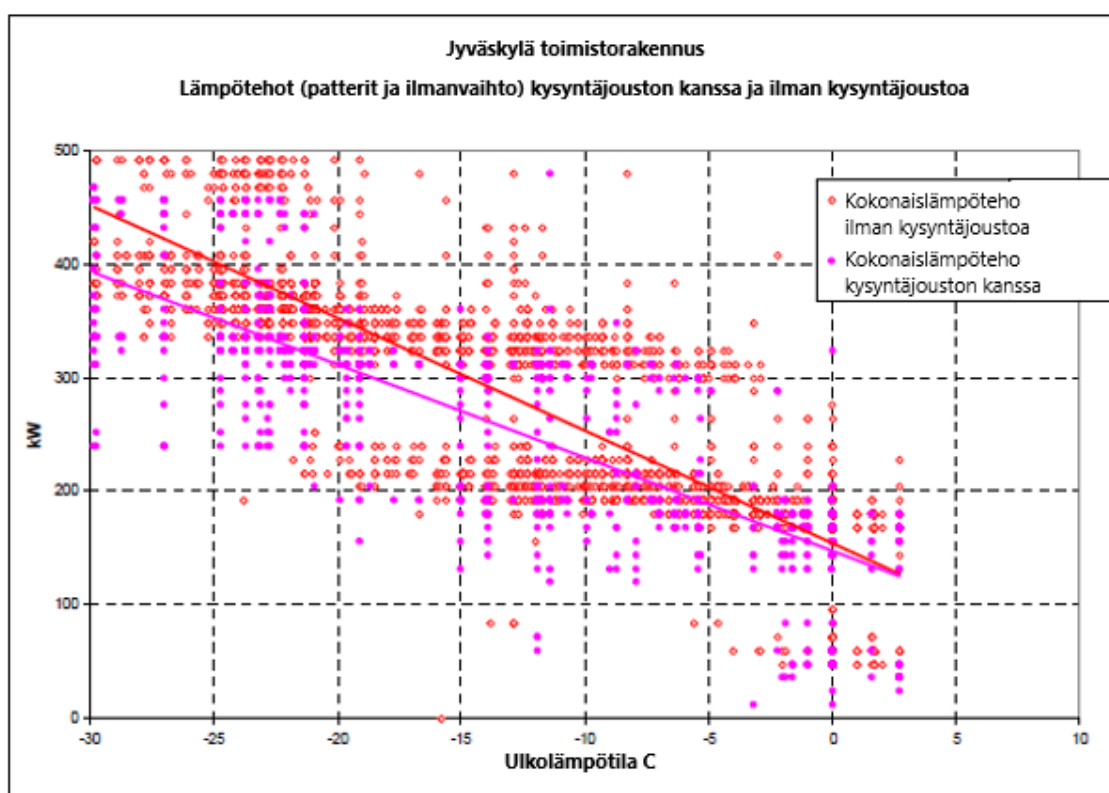
Kaukolämmön kysyntäjoustopon tehopotentiaali muodostuu rakennuksen lämpöhäviöstä ja lämmönvarausominaisuuksista vallitsevassa säättilassa yhdistettynä sisäisillä lämpökuormilla sekä lämmitysjärjestelmän tyypistä ja hyötysuhteesta, jonka perusteella rakennuksen hetkellinen lämmitysteho määräytyy. Lisäksi kokonaislämmitystehtoon vaikuttaa lämpimän käyttöveden kulutus ja sen käyttöprofiili. (Holmqvist 2018, 30.)

Kysyntäjoustopon tapahtuu käytännössä rajoittamalla esimerkiksi patteriverkostossa tai ilmanvaihtoverkostossa kiertävän menoveden lämpötilaa hetkellisesti. Näin asiakkaan lämmönkulutus laskee hetkellisesti. Rakennukseen voidaan varastoida lämpöenergiaa muutama tunti ennen kysyntäjoustopon alkamista. Joustopon jälkeen lämpötehoa on kasvatettava normaalia korkeammalle tasolle, jotta joustettava kohde saadaan lämmitettyä normaalille tasolle. (Timonen 2018, 39.)

Kärkkäinen ym. (2003) tutkimuksessaan osoitti, että kahdessa suomalaisessa betonirunkoisessa rakennuksessa voitiin leikata lämmitystehoa 2–3 tunnin jaksolla keskimäärin 20–25 %, hyödyntämällä rakennusten massaa ja vesikeskuslämmitystä. Tutkimuksessa huonelämpötilojen

sallittu muutos oli  $\pm 2$  °C normaalista sisälämpötilasta. Kysyntäjousto toteutettiin lämmitysverkoston menoveden säätökäyrän poikkeuttamisella siten, että kysyntäjoustopahtumassa säätökäyrää siirrettiin normaalin lämmityskäyrän alapuolelle enintään -60 %. Kärkkäinen ym. (2003) mukaan tällä menetelmällä voidaan leikata kaukolämpöverkon kokonaiskuormasta jopa 20 %, menetelmää tulee kuitenkin hyödyntää silloin useissa rakennuksissa samanaikaisesti.

Kuvassa 11 on esitetty tutkimuksessa mukana olleen toimistorakennuksen normaali lämmitystehontarve ulkolämpötilansuhteen sekä tehontarve -60 % säätökäyrän poikkeuttamisella. Kiinteistössä leikattiin huipputehontarvetta 15 %. Joustopotentiali häviää rakennuksesta tässä tapauksessa, kun ulkolämpötila saavuttaa +3 °C. (Kärkkäinen ym. 2003, 54.)



KUVA 11. Kysyntäjousto vaikutus rakennuksen lämpötehon tarpeeseen eri ulkolämpötiloilla (Kärkkäinen ym. 2003, 54.)

## 5 PILOTIN TOTEUS JA TULOKSET

Alvan kaukolämpöverkossa kysyntäjoustopilotointia toteutettiin lämmityskaudella 2019–2020 yhteistyössä neljän eri järjestelmätoimittajan kanssa. Tavoitteena oli selvittää ja löytää erilaisia teknisiä ratkaisuja, joiden avulla kysyntäjoustopilotointia voidaan jatkossa Jyväskylässä toteuttaa. Toimijoiden palveluihin kuuluu energiatehokkaiden automaatiojärjestelmien suunnittelu, toteutus ja ylläpito. Valmius toteuttaa kysyntäjoustopilotointia vaihteli eri järjestelmätoimittajien välillä, osalla toimijoista oli valmiita ratkaisuja ja järjestelmiä kysyntäjoustopilotointia varten. Kolmella toimijalla oli tarjota selainpohjainen etävalvontajärjestelmä, jonka avulla pystyi hallitsemaan joustopyyntöjä. Valvontajärjestelmän tekninen taso vaihteli myös eri toimijoiden välillä ja yhden toimijan järjestelmä erottui edukseen selkeästi muista.

Pilottiin osallistui kahdeksan erilaista rakennusta Jyväskylän alueelta; yksi päiväkotikoulu, kaksi kerrostaloa ja kolme oppilaitoskiinteistöä. Yhdessä oppilaitoskiinteistössä oli mukana kolme erillistä rakennusta, jota tarkasteltiin opinnäytetyössä kokonaisuutena, johtuen kaukolämmön kytkennöistä. Järjestelmätoimittajat tekivät valittuihin kohteisiin tarvittavat järjestelmäsennukset, ohjelmointityön kiinteistöautomaatioon sekä tiettyihin kohteisiin lämpötila- ja kosteusantureiden sennukset. Kysyntäjoustopilotointia toteutustavat vaihtelivat eri kiinteistöjen ja toimijoiden välillä. Kysyntäjoustopilotointiin osallistuvista lämmityspiireistä ja joustopilotointiin osallistuvien rakennusten raja-arvoista sovittiin kaukolämpöasiakkaan ja järjestelmätoimittajien kanssa. Pilotissa eri kiinteistöjen aloitusajankohdat vaihtelivat lokakuun puolivälistä maaliskuun puoliväliin. Joustopilotointi asetettiin huhtikuun loppuun asti. Pilotissa lämmityskauden joustot jaettiin joustopilotointiin. Joustopilotointi vaihtuessa muutettiin joustotilaa, joustotilaa, joustotilaa tai näitä kaikkia, saavuttaakseen kiinteistöä suurimman joustotehon kuitenkin sisäolosuhteita heikentämättä.

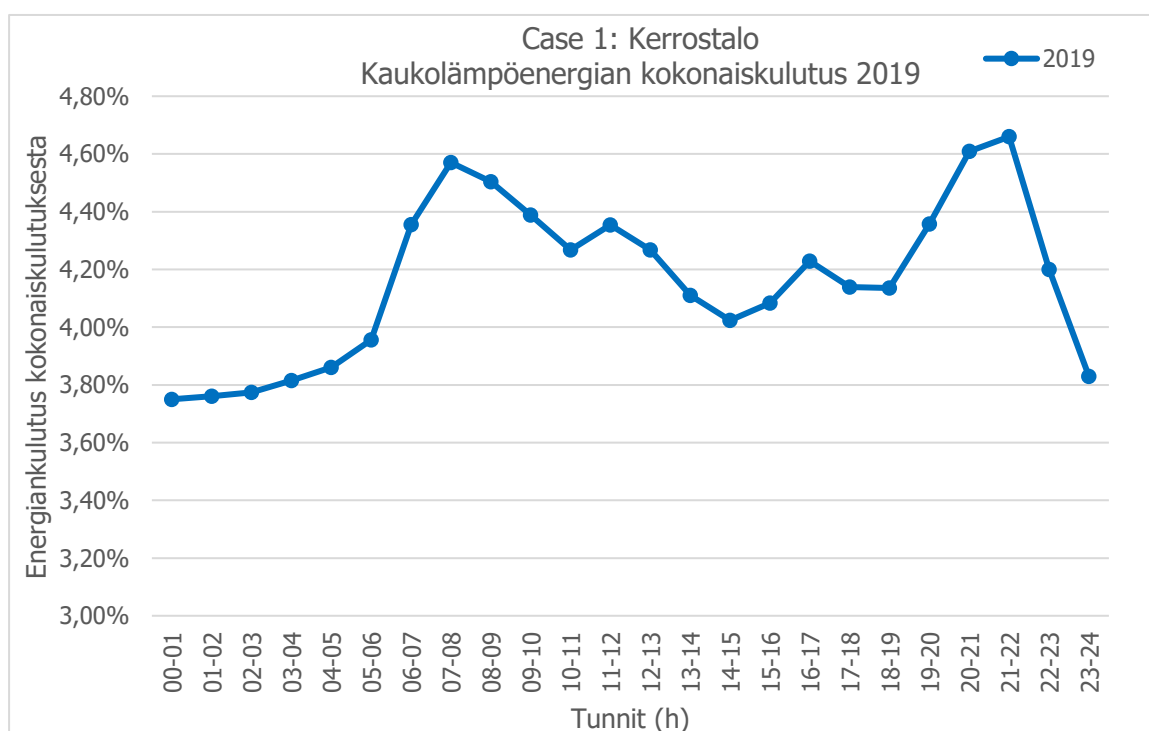
Pilotin tuloksia tarkasteltiin joustopilotointiin tuntikohtaisesti. Tuloksista oli havaittavissa lähes jokaisen toimijan kanssa sama tapahtuma. Pienillä kysyntäjoustopilotointiin asetettavilla ensimmäisen tunnin joustoteho on suurempi kuin seuraavien tuntien. Lisäksi kaukolämmön paluuveden lämpötilan hetkellinen nousu näyttää ajoittuvan joustotilanteille tilanteissa, jossa käyttöveden kulutus on pientä.

Tuloksissa on arvioitu kiinteistökohtaista joustopotentialia eri ulkolämpötiloissa joustotehona sekä prosentuaalisesti (verrattuna referenssiin). Referenssidatana käytettiin aiempien vuosien energiankulutustietoja joustotilanteista vastaavilta ulkolämpötiloilta. Kuvaajissa mittapisteet ovat joustotilanteen tunteittain energiankulutus eli teho. Mittapisteitä ollessa tarpeeksi paljon, on voitu niiden perusteella tehdä lineaarinen sovite. Tämän soviteen avulla on kuvaajien alla esitettyyn taulukkoon arvioitu joustoteho ja joustotilanteen prosentuaalinen osuus hetkellisestä tehosta eri ulkolämpötiloissa.

## 5.1 Case 1: Kerrostalo

Jyväskylän Taulumäellä sijaitsevassa kerrostalossa pilotointi aloitettiin vuoden 2019 joulukuun puolivälistä alkaen. Kiinteistö on vuonna 1989 rakennettu 40 huoneistoinen kerrostalo. Kaukolämpöenergian kulutus vuonna 2019 oli 448 MWh ja ominaiskulutus 49 kWh/m<sup>3</sup>. Kaukolämmitteisen kiinteistön lämmönluovutustapa on vesikiertoinen patterilämmitys, lämmönsiirtimen nimellisteho on 200 kW. Kohteeseen oli suoritettu lämmönjakokeskuksen saneeraus kesällä 2019 sekä patteriverkoston perussäätö ja tasapainotus lämmityskauden alussa. Kohteen kaikki asunnot varustettiin etäluettavilla lämpötila- ja kosteusantureilla. Kiinteistöautomaatio liitettiin etävalvontajärjestelmään, johon järjestelmätoimittaja oli rakentanut selainpohjaisen graafisen käyttöliittymän. Etävalvontajärjestelmästä oli luettavissa asuntokohtaiset sisälämpötilat, kosteudet, lämmitysjärjestelmän meno- ja paluuveden lämpötilat, kaukolämmön meno- ja paluuveden lämpötilat, käyttöveden lämpötilat, toimilaitteiden ohjaukset. Lämmönjakokeskuksen mittauspisteistä oli saatavilla myös kattavasti historia- ja livetrendejä.

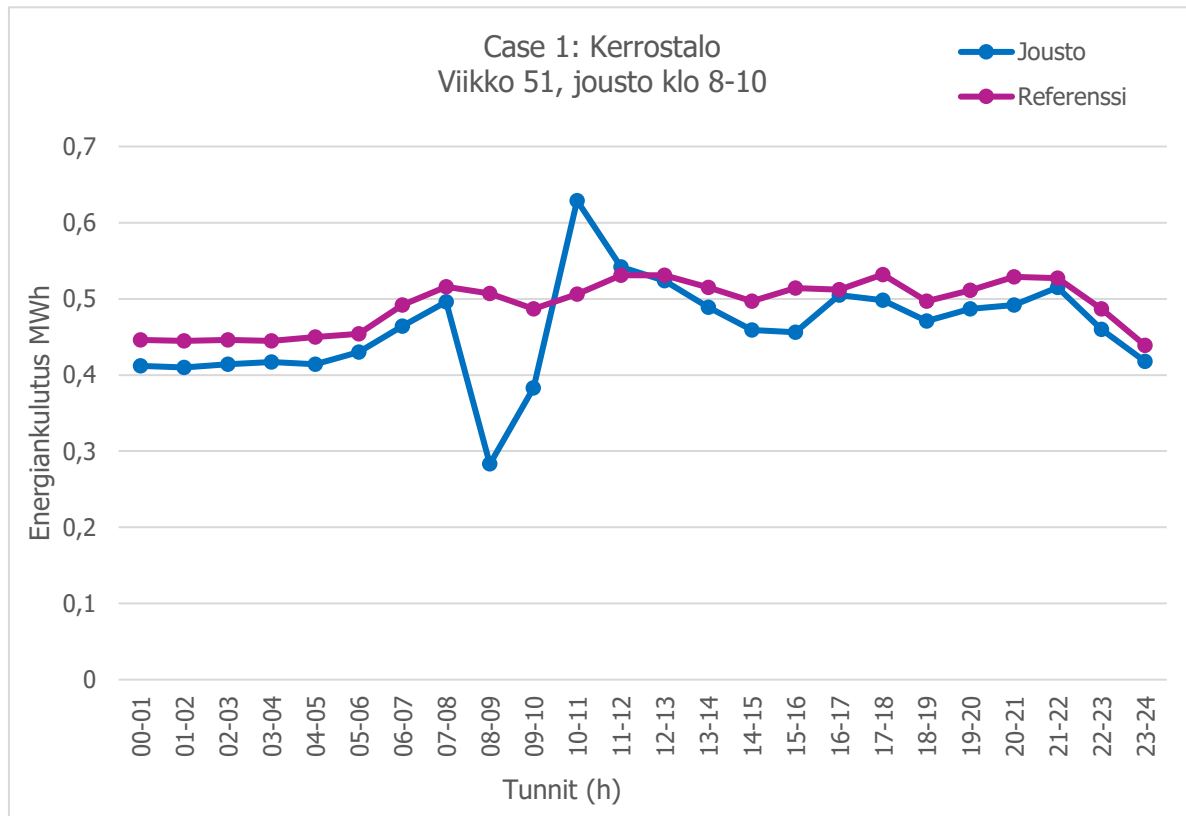
Kysyntäjoustoja toteutettiin kohteessa aikaohjelmalla ohjattuna, suoraan patteriverkoston menoveden lämpötilaa hetkellisesti pudottamalla. Joustoja suoritettiin joulukuun puolivälistä huhtikuun loppuun saakka. Tällä ajanjaksolla joustojen pituutta sekä asetusarvoja muutettiin muutamaan kertaan parhaimman joustotehon löytämiseksi vaikuttamatta kuitenkaan sisäolosuhteisiin. Ensimmäisen joustojakso suoritettiin kahden tunnin joustoilla, aamuisin klo 8–10. Patteriverkoston menoveden lämpötilaa pudotettiin -8 °C, sen hetkisestä lämpötilasta. Tuloksista oli nopeasti havaittavissa jouston jälkeisen kulutuspiikin syntyminen. Ongelman ratkaisuksi pyydettiin järjestelmätoimittajaa tekemään muutoksia käyttöliittymään. Järjestelmätoimittaja ohjelmoi etävalvontajärjestelmään painikkeen, minkä avulla patteriverkoston menoveden lämpötilan muutosnopeus oli käyttäjän säädettävissä.



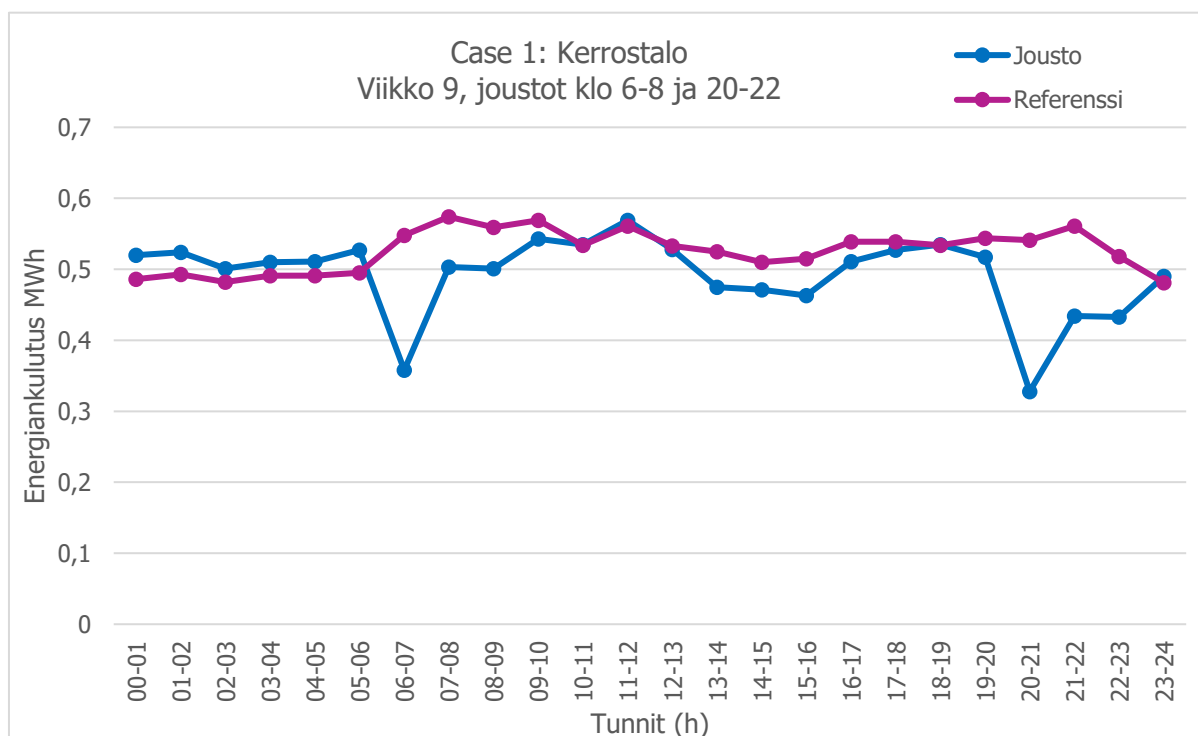
KUVA 12. Kiinteistön kaukolämpöenergian prosentuaalinen kulutus vuorokauden tunneille jaettuna



Kuvassa 13 patteriverkoston menoveden lämpötilaa pudotettiin klo 8–10 välillä  $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$  sen hetkisestä lämpötilasta. Jälkipiikin syntymisen estämiseksi kohteessa testattiin erilaisia variaatioita, jossa tehtiin muutoksia patteriverkoston menoveden lämpötilan pudotuksiin sekä jouston jälkeisen menoveden lämpötilan muutosnopeuteen. Näiden toimenpiteiden avulla löydettiin joustoihin asetusravot, jolloin jälkipiikkiä ei pääse kulutukseen syntymään.



KUVA 13. Energiankulutuksen summakäyrän profilista on havaittavissa jälkipiikin muodostuminen

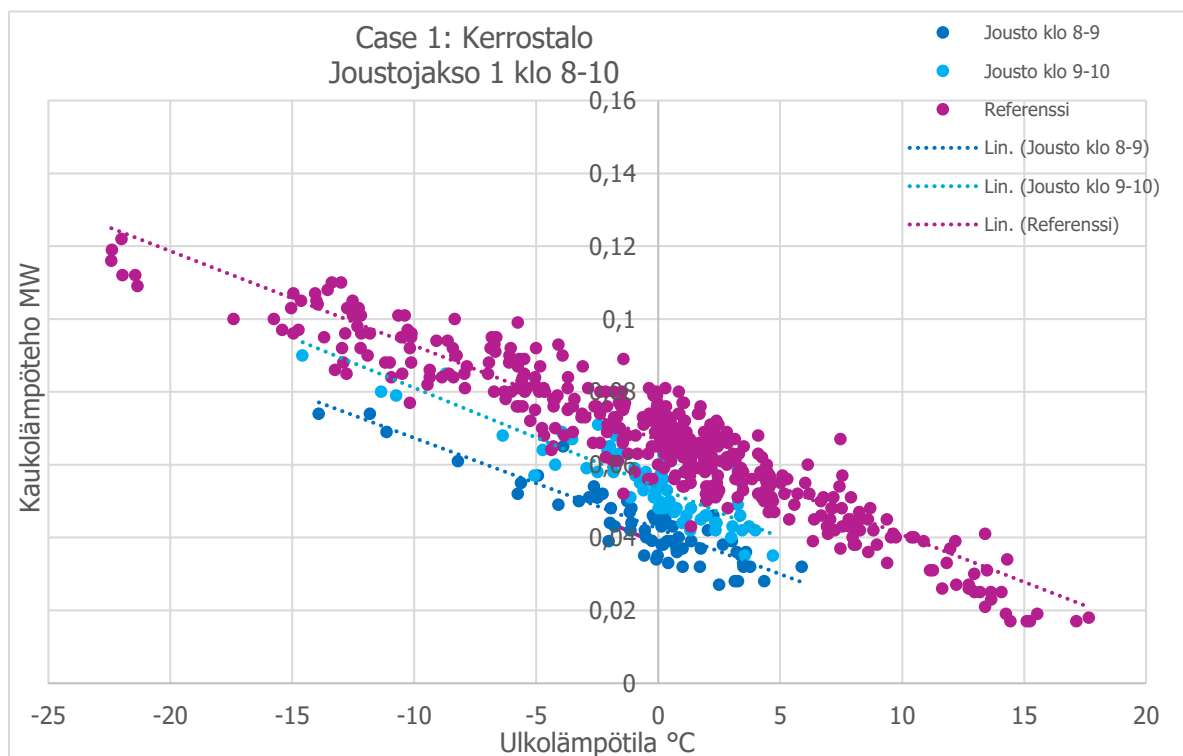


KUVA 14. Energiankulutuksen summakäyrä menoveden muutosnopeuden säätämisen jälkeen

Järjestelmätoimittaja ohjelmoi käyttöliittymään painikkeen, jonka avulla käyttäjä pystyi säätämään jouston jälkeisen menoveden lämpötilan muutosnopeutta. Kuvassa 14 patteriverkoston menoveden lämpötilaa pudotettiin klo 6–8 ja 20–22 välillä  $-12\text{ °C}$  sen hetkisestä lämpötilasta. Joustotapahtuman jälkeen patteriverkoston menoveden lämpötila asetettiin palautumaan säätökäyrää vastaavaksi nopeudella  $15\text{ min/°C}$ . Tämä muutosnopeus nähtiin riittäväksi jälkipiikin leikkaamiseen.

Lämmityskauden 2019–2020 leudon sään vuoksi joustojen vaikutus sisälämpötiloihin jäivät vähäisiksi. Kyseisessä kohteessa joustojen vaikutus sisälämpötiloihin oli suurimmillaan noin  $-1\text{ °C}$  verran, huomioitavaa on, että sisälämpötilat eivät laskeneet kertaakaan suositeltujen lämpötilojen alle vaan suurimmat lämpötilan muutokset tapahtuivat ”ylikämmettyissä” asunnoissa. Kysyntäjoustopotentialissa sisälämpötiloihin vaikuttaa olennaisesti ulkoilmanlämpötila, jouston pituus ja joustettavien lämmitysverkkojen asetusarvot. Tapauksessa osaltaan sisälämpötiloihin vaikutti lämmitysjärjestelmän säätimen ohjelmointi, se ei toiminut toivotulla tavalla suuremmilla menoveden lämpötilan asetusarvoilla.

Seuraavissa kuvissa on arvioitu kiinteistökohtaista joustopotentialia eri ulkolämpötiloissa joustotehona sekä prosentuaalisesti (verrattuna referenssiin). Kuvissa mittapisteet ovat joustoajan tuntitason energiankulutus eli teho. Mittapisteitä ollessa tarpeeksi paljon, on voitu niiden perusteella tehdä lineaarinen sovite. Tämän sovitteen avulla on kuvaajien alla esitettyyn taulukkoon arvioitu joustoteho ja jouston prosentuaalinen osuus hetkellisestä tehosta eri ulkolämpötiloissa.

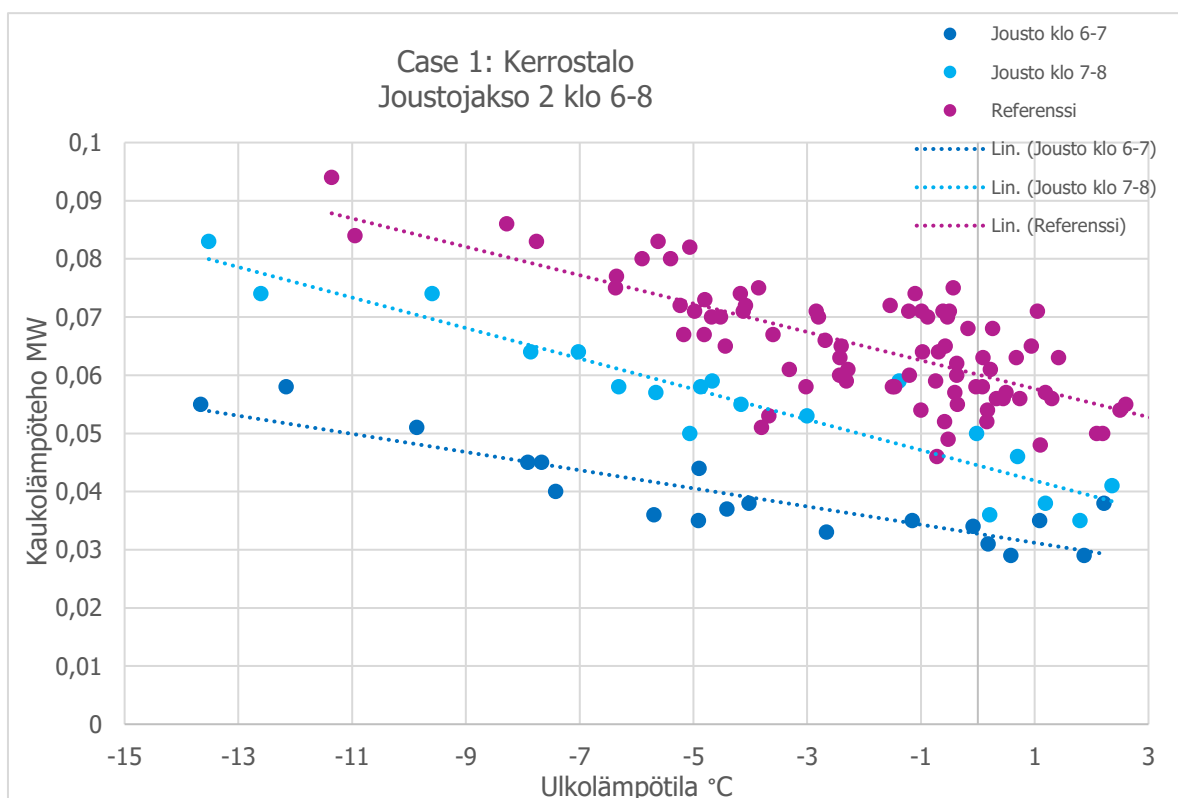


KUVA 15. Case 1: Joustojakso 1, klo 8–10, 12.12.2019– 23.2.2020

Ensimmäisen joustojakson aikana patteriverkoston menoveden lämpötilaa pudotettiin  $-8\text{ °C}$  aikaohjelmalla ohjatusti klo 8–10 välillä. Taulukoista 1 ja 2 on havaittavissa, että pienemmillä jouston asetusarvoilla ensimmäinen tunti on joustoteholtaan suurempi kuin seuraava tunti. Tämän arveltiin johtuvan siitä, että lämmitysjärjestelmän kaukolämpöventtiili sulkeutuu jouston alkaessa hetkellisesti. Kun patteriverkoston menoveden lämpötila on saavuttanut uuden asetusarvonsa, kaukolämpöventtiili lähtee hiljalleen avautumaan pitääkseen menoveden lämpötilan uudessa asetusarvossaan. Kuvasta 17 nähdään, että suuremmilla jouston asetusarvoilla kyseistä ongelmaa ei ole. Kyseisessä tapahtumassa kaukolämpöventtiili pysyy kiinni lähes koko jouston ajan, näin ollen molempien tuntien joustoteho on suunnilleen sama.

TAULUKKO 1. Case 1: Joustojakso 1, arvioitu joustopotentiali klo 8–10, 12.12.2019- 23.2.2020

Ulkolämpötila	Joustoteho kW klo 8–9	Joustoteho kW klo 9–10	Klo 8–9	Klo 9–10	Hetk. teho kW keskimäärin
5	24	13	44 %	25 %	54
0	24	13	36 %	19 %	67
-5	25	12	31 %	16 %	80
-10	25	12	27 %	13 %	93
-15	26	11	24 %	11 %	106

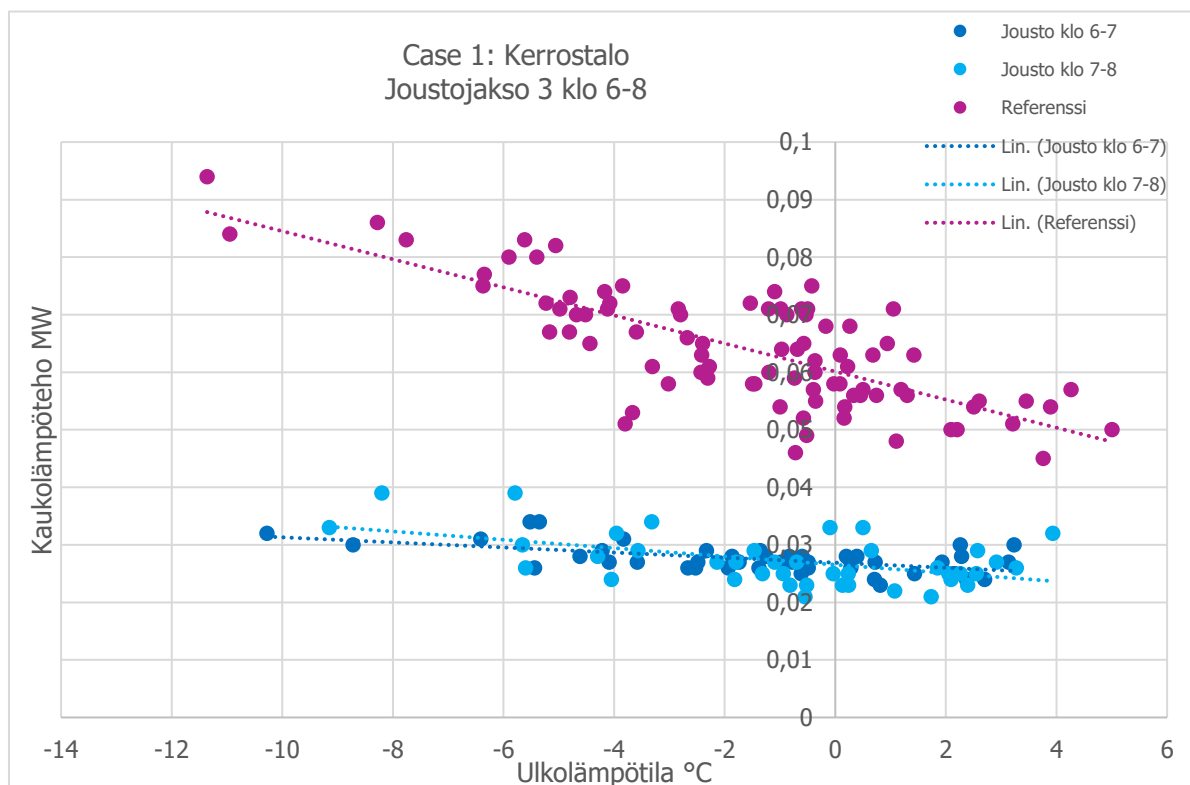


KUVA 16. Case 1: Joustojakso 2, klo 6–8, 24.2- 15.3.2020

Seuraavan joustojakson aikana patteriverkoston menoveden lämpötilaa pudotettiin sen hetkisestä lämpötilasta  $-12\text{ °C}$ . Kuvasta 16 on havaittavissa samantyyppinen tapahtuma kuin kuvassa 15. Jouston ensimmäinen tunti, kello 6–7 on joustoteholtaan suurempi kuin seuraava tunti.

TAULUKKO 2. Case 1: Joustojakso 2, arvioitu joustopotentiali klo 6–8, 24.2- 15.3.2020

Ulkolämpötila	Joustoteho kW klo 6–7	Joustoteho kW klo 7–8	Klo 6–7	Klo 7–8	Hetk. teho kW keskimäärin
5	23	17	48 %	35 %	48
0	27	16	45 %	26 %	60
-5	31	15	43 %	20 %	72
-10	35	14	42 %	16 %	84
-15	39	13	41 %	13 %	96



KUVA 17. Case 1: Joustojakso 3, klo 6–8, 16.3-30.4.2020

Kolmannen joustojakson aikana patteriverkoston menoveden lämpötilaa pudotettiin sen hetkisestä lämpötilasta -20 °C. Kuvasta 17 nähdään, että joustotuntien aikana joustotehot olivat lähes samansuuruiset. Riittävän suuri menoveden lämpötilan pudotus patteriverkossa riittää tietyissä ulkolämpötiloissa pitämään kaukolämpöventtiilin suljettuna kahden tunnin kestävä jouston ajan. Taulukosta 3 on havaittavissa joustotehojen olevan lähes samansuuruiset kahden tunnin jouston aikana.

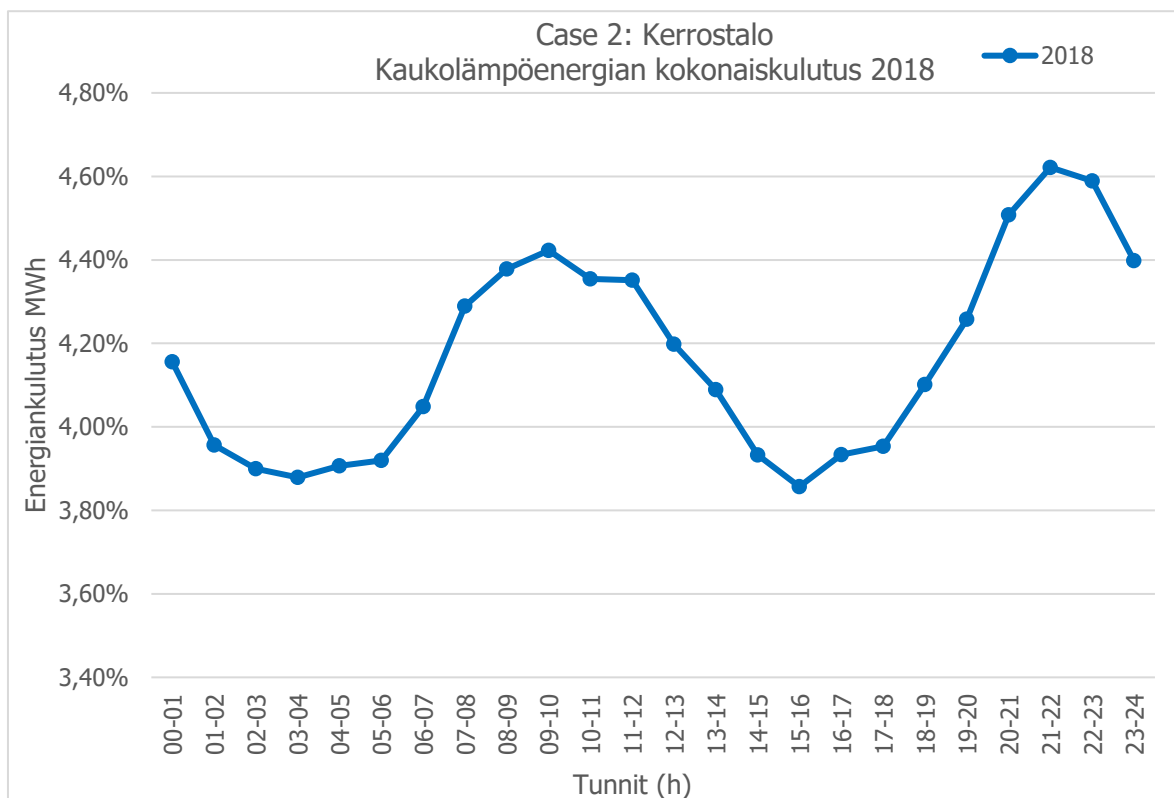
TAULUKKO 3. Case 1: Joustojakso 3, arvioitu joustopotentiali klo 6–8, 16.3-30.4.2020

Ulkolämpötila	Joustoteho kW klo 6–7	Joustoteho kW klo 7–8	Klo 6–7	Klo 7–8	Hetk. teho kW keskimäärin
5	23	25	48 %	52 %	48
0	33	34	55 %	56 %	60
-5	43	42	60 %	58 %	72
-10	53	51	63 %	60 %	84
-15	63	59	66 %	61 %	96

## 5.2 Case 2: Kerrostalo

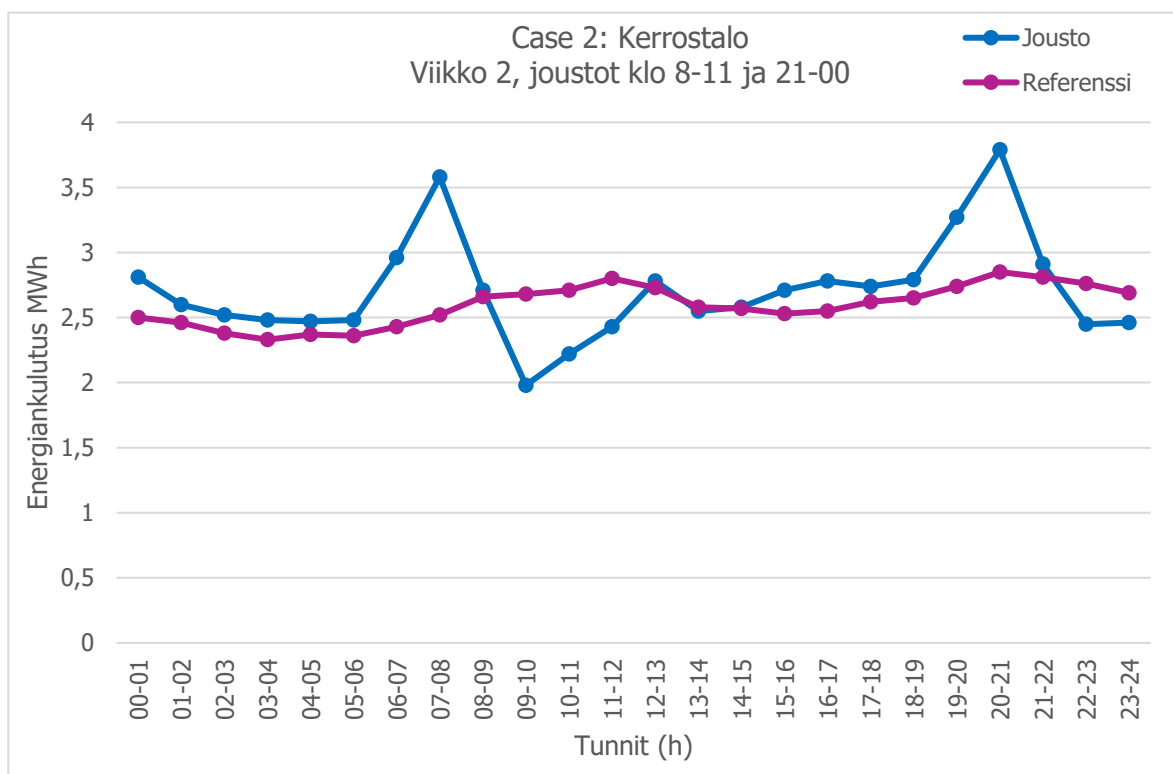
Jyväskylän Kortepohjassa sijaitsevassa kerrostalossa oli pilotoitu kysyntäjoustoa Alvan toimesta jo aiemmalla lämmityskaudella. Pilottia jatkettiin lämmityskauden 2019–2020 ajan. Kohde oli vuonna 1973 valmistunut 238 huoneistoinen kerrostalo, jossa kaukolämpöenergian kulutus vuonna 2019 oli 1545 MWh ja ominaiskulutus 44 kWh/m<sup>3</sup>. Joustoihin osallistui vain patteriverkosto ja sen lämmönsiirtimen teho oli 985 kW. Järjestelmätoimittajalta kysyttäessä jouston asetusarvoista, vastauksena saatiin, että kiinteistö joustaa sen verran mitä järjestelmästä on saatavilla. Tarkoittaen, että jos sisälämpötilat putoavat liikaa, jousto keskeytetään takaisinkytkennän ohjaamana. Kiinteistöön oli asennettu kahdeksan lämpötila-anturia eri puolille rakennusta. Joustoaika oli ajoitettu kiinteistön kulutushuippujen mukaan klo 8–11 ja klo 21–00 (kuva 18). Jouston aiheuttamaa ”energiavajetta” varten kiinteistöä esilämmitettiin 30–90 minuuttia ennen kysyntäjouston toteuttamista. Tästä aiheutuu merkittävä hetkellinen tehontarpeen nousu ennen joustoa.

Kohteen järjestelmätoimittajalla ei ollut tarjota valmista järjestelmää kysyntäjoustoan liittyen. Näin ollen kaikki kysyntäjoustoan liittyvät asiat jouduttiin käsittelemään sähköpostitse. Lämpötila-antureiden dataa ei pilotin aikana päästy seuraamaan, tästä syystä ei ole tarkkaa tietoa, miten jousto on vaikuttanut sisäolosuhteisiin. Tarkempaa tietoa joustojen asetusarvoista ei pilotin aikana saatu. Haasteina kohteessa oli etävalvontajärjestelmän puuttuminen, esilämmityksen toteutustapa ja yhteistyö järjestelmätoimittajan kanssa.



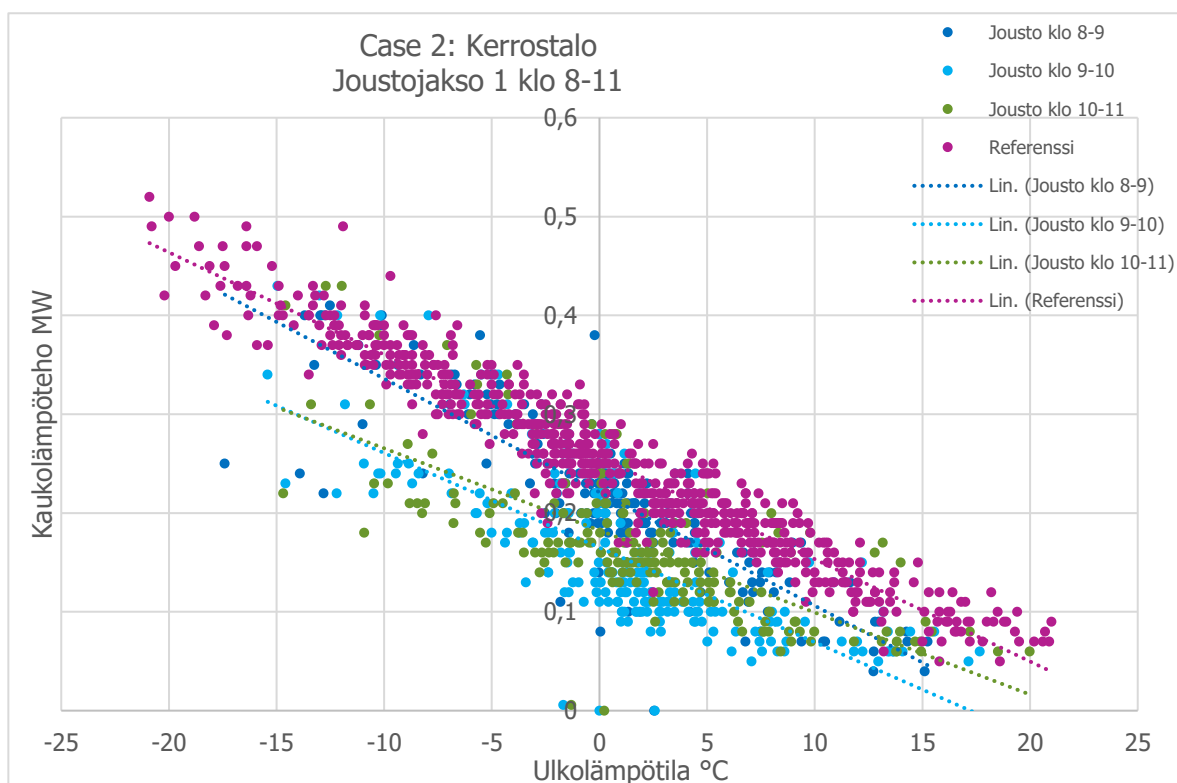
KUVA 18. Kiinteistön kaukolämpöenergian prosentuaalinen kulutus vuorokauden tunneille jaettuna

Pilotin tuloksia tarkasteltaessa huomattiin, että järjestelmätoimittaja ei katkaissut joustoja keväällä 2019. Joustokäskyt ovat olleet toiminnassa koko 2019 vuoden. Ensimmäiseltä joustojaksolta on jätetty kesäajan mittaustulokset pois. Taulukosta 4 ja 5 voidaan havaita järjestelmätoimittajan kysyntäjoustop toteutustavasta johtuva ensimmäisen joustotunnin tehon puuttuminen. Tämän arveltiin johtuvan liiallisesta esilämmityksestä sekä jouston alkaessa menoveden lämpötilan muutosnopeuden hitaudesta.



KUVA 19. Energiankulutuksen summakäyrän profilista on havaittavissa esilämmityksestä johtuva kulutuspiikki sekä joustotapahtuma

Kuvasta 19 on havaittavissa suuret esilämmityspiikit ennen varsinaista joustotapahtumaa. Tällä menetelmällä pystytään välttämään jouston jälkeisen jälkipiikin syntyminen. Hallitsemattomana esilämmityspiikki saattaa kuitenkin nousta jopa korkeammaksi kuin normaalitilanteessa todellinen huipputeho. Huipputeho- komponenttia käytetään usein osana kaukolämmön hinnoittelussa. Asiakkaan näkökulmasta kyseinen tapahtuma kovilla pakkasilla saattaisi johtaa entistä korkeimpiin huipputehomaksuihin. Pilotin aikana järjestelmätoimittajaa ei saatu tekemään Alvan haluamia muutoksia joustojen parametreihin.



KUVA 20. Case 2: Joustojakso 1, klo 8–11, 1.2–30.4 ja 1.9– 31.12.2019

Kuvasta 20 sekä taulukosta 4 on havaittavissa kiinteistön lämpötehon käyttäytyminen joustojen aikaan. Ensimmäisen tunnin joustoteho on huomattavasti pienempi kuin kahden seuraavan tunnin. Tämän nähtiin johtuvan kiinteistön liiallisesta esilämmityksestä sekä jouston alkaessa menoveden lämpötilan muutosnopeuden hitaudesta. Ongelman olisi voinut välttää nopeuttamalla kaukolämpöventtiilin sulkeutumista jouston alkaessa.

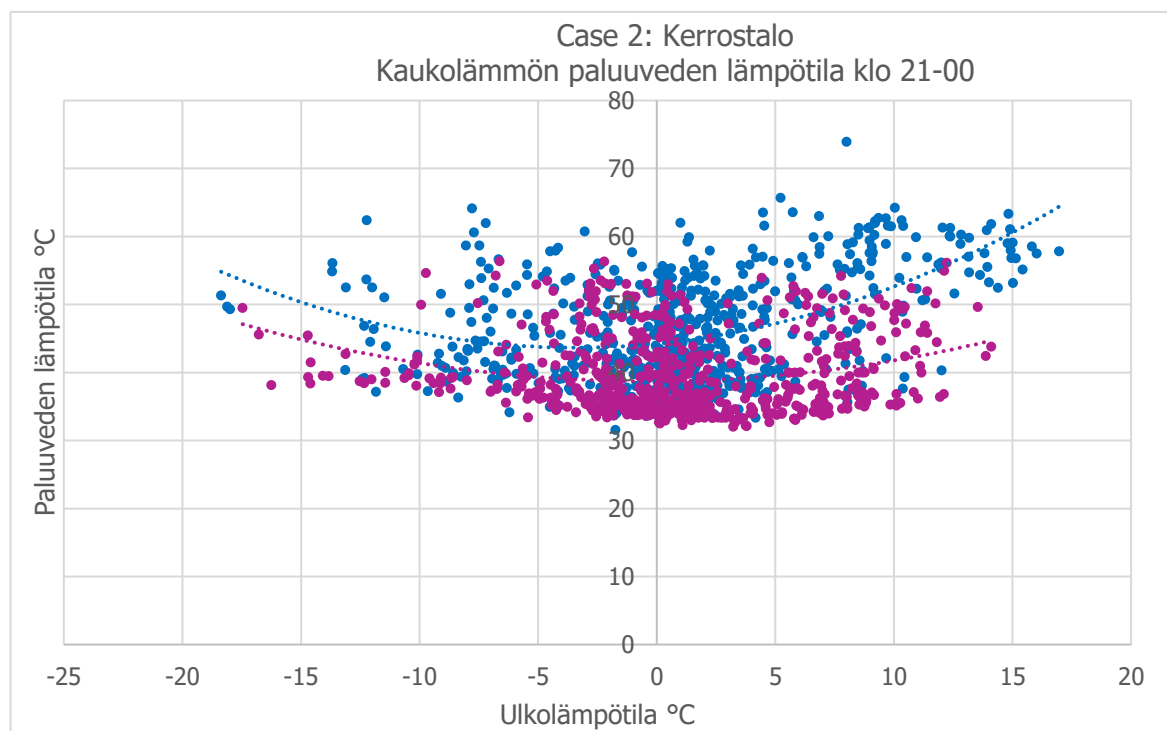
TAULUKKO 4. Case 2: Joustojakso 1, arvioitu joustopotentiali klo 8–11, 1.2–30.4 ja 1.9– 31.12.2019

Ulkolämpötila	Joustoteho 8–9 (kW)	Joustoteho 9–10 (kW)	Joustoteho 10–11 (kW)	Klo 8–9	Klo 9–10	Klo 10–11	Hetk. teho kW keskimäärin
5	41	88	64	20 %	43 %	31 %	205
0	36	92	74	14 %	36 %	29 %	257
-5	30	96	85	10 %	31 %	27 %	309
-10	25	100	95	7 %	28 %	26 %	361
-15	19	104	106	5 %	25 %	26 %	413

Kohteessa tarkasteltiin myös kaukolämmön paluueden käyttäytymistä kysyntäjoustotapahtumissa. Taulukosta 5 on havaittavissa vuoden 2019 joustotapahtumien vaikutus kaukolämmön paluueden lämpötiloihin. Paluueden lämpötilat kyseisiltä joustojen ajoilta ovat huomattavasti korkeammat kuin referenssijaksossa. Mittapisteet kuvassa 23 ovat kaukolämmön paluueden tuntikohtaisia keskiarvolämpötiloja, niiltä tunneilta, kun kiinteistössä suoritetaan kysyntäjoustoa. Referenssinä on



käytetty vastaavien tuntien lämpötiloja vuodelta 2017. Kuvasta 23 on havaittavissa kaukolämmön paluuveden lämpötilan nousua niillä tunneilla, kun joustoja suoritetaan.



KUVA 23. Kaukolämmön paluuveden tuntikohtaiset lämpötilat joustettavilta tunneilta 1.2–30.4 ja 1.9- 31.12.2019

TAULUKKO 5. Ulkolämpötilan keskiarvo ja kaukolämmön paluuveden keskilämpötilat 2019 ja 2017

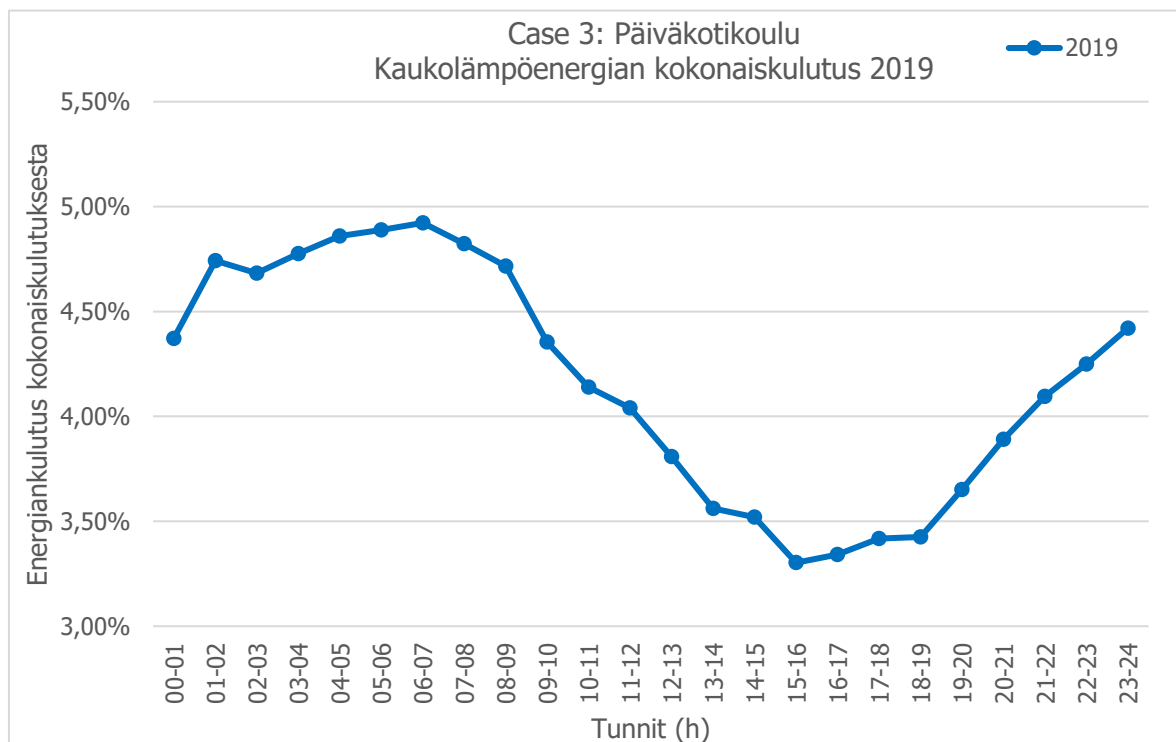
<b>Ulkolämpötila ka. 2019</b> 1,28 °C	<b>Paluuveden lämpötila ka. 2019</b> 46,87 °C
<b>Ulkolämpötila ka. 2017</b> 0,95 °C	<b>Paluuveden lämpötila ka. 2017</b> 40,14 °C

### 5.3 Case 3: Päiväkotikoulu

Vuonna 2019 valmistuneessa päiväkotikoulussa aloitettiin kysyntäjoustopilotointi maaliskuussa 2020. Kiinteistössä oli käytössä järjestelmätoimittajan kiinteistönhallintajärjestelmä, johon oli rakennettu Alvan kysyntäjoustopilotointia varten selainpohjainen käyttöliittymä. Graafisesta käyttöliittymästä pystyi seuramaan kiinteistön kaukolämmön hetkellistä tehoa, lämmitysverkostojen lämpötiloja sekä säätöventtiilien tilatietoja mm. livetrendistä. Kiinteistöön ei asennettu lämpötilaa mittaavia antureita, minkä vuoksi sisäolosuhteista ei saatu tietoa. Järjestelmään oli rakennettu kiinteistön sisäinen kysynnänjouston tehoasetus, jonka avulla joustopyynnöt asetettiin.

Järjestelmään annettiin joustopyyntöjä maaliskuu-huhtikuussa. Tehoasetuksen avulla järjestelmään voitiin antaa suoraan käsky pudottaa kiinteistön kaukolämmön hetkellistä tehoa. Lämmitysverkostot oli jaettu kahteen eri joustoportaaseen, josta järjestelmän algoritmit laskivat mitkä verkostot osallistuvat joustoon saavuttaakseen halutun joustotehon. Ensimmäiseen joustoportaaseen kuului

patteri-, lattialämmitys- ja oviverhohallinverkot ja toisessa portaassa oli iv-verkosto. Jouston aikana järjestelmä teki automaattisesti muutoksia lämmitysverkoston asetusarvoihin sekä vaihteli joustoportaita pitääkseen kaukolämmön hetkellisen tehon annetussa asetusarvossaan. Järjestelmään oli myös ohjelmoitu mahdollisuus tankata kiinteistöön lämpöenergiaa. Pilotissa testattiin 30 kW pudotusta tunnin ajan sekä 40 kW pudotusta kahden tunnin ajan.



KUVA 24. Kiinteistön kaukolämpöenergian prosentuaalinen kulutus vuorokauden tunneille jaettuna

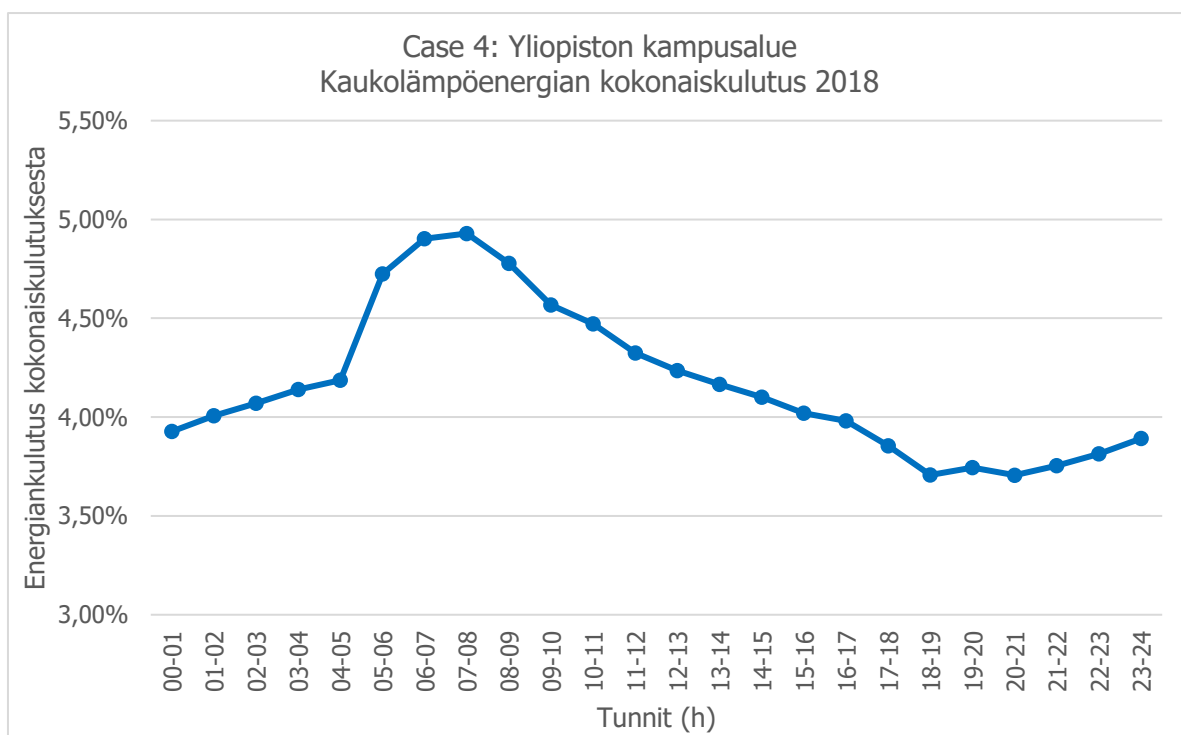
Aikaohjelman puuttumisen vuoksi joustojen suorittaminen kohteessa on haastavaa. Kiinteistön kulutusprofiilin mukaan (kuva 24) kulutushuiput osuvat noin kello 4–7 väliin. Kohteessa käsin asetetut joustot suoritettiin kello 8–10 välillä, jolloin kiinteistön kulutuskäyrä on jo laskeva.

#### 5.4 Case 4: Yliopiston kampusalue

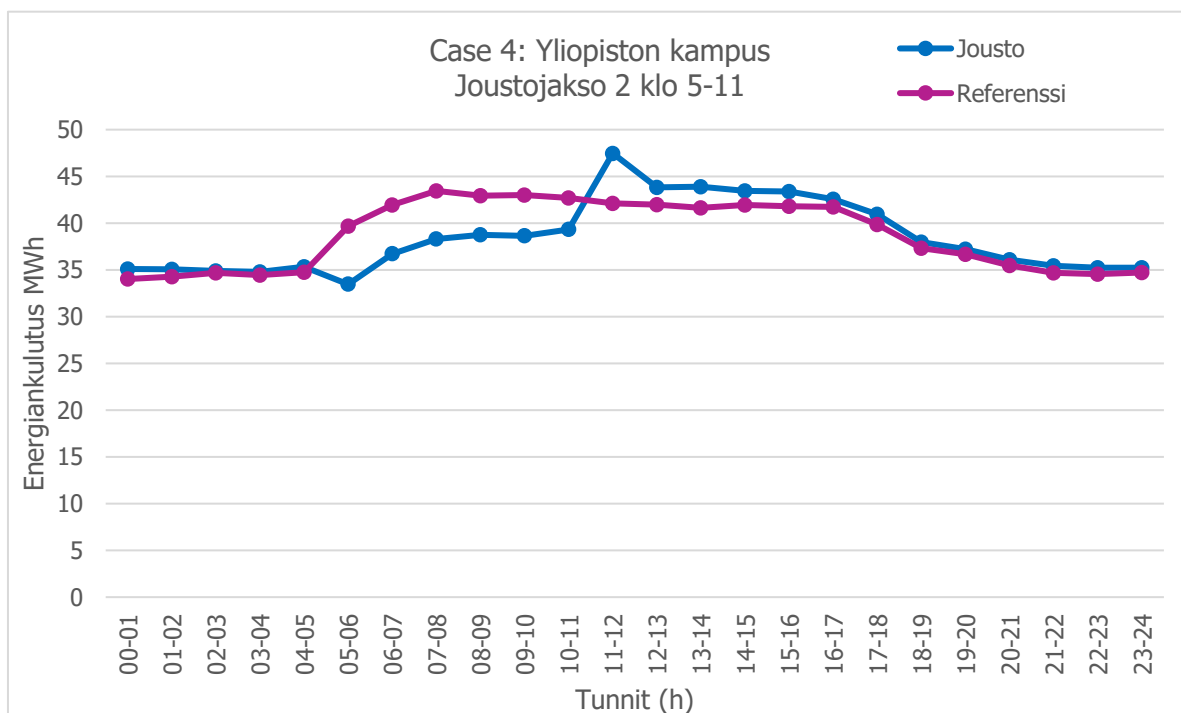
Alva oli suorittanut pilotointia kyseisessä kohteessa jo lämmityskaudella 2018–2019. Kysyntäjoustopilotointia jatkettiin yliopiston kampusalueen kolmessa kiinteistössä lokakuussa 2019. Joustot toteutettiin etävalvontajärjestelmässä lämmitysverkoston menoveden lämpötilaa pudottamalla sekä ilmanvaihtokoneiden ilmamäärää hetkellisesti rajoittamalla. Etävalvontaan oli ohjelmoitu myös sääennusteeseen perustuva automaattinen ”kylmän” aamun huipputehon leikkaus. Toimintoa ei lauhan talven takia päästy testaamaan.

Patteriverkostoja pudotettiin sen hetkisestä lämpötilasta – 12 °C, lattialämmitysverkostoja – 8 °C ja ilmanvaihtokoneissa muutettiin kiinteistökohtaisesti ilmavirran painetason asetusarvoa. Kiinteistöissä seurattiin lämpötilaa, kosteutta sekä yhden rakennuksen osalta hiilidioksidipitoisuutta antureiden avulla. Nämä tiedot ovat saatavilla etävalvontajärjestelmästä lähes reaaliaikaisesti. Joustopyynnöt asetettiin etävalvomosta aikaohjatusti ja joustojen pituudet vaihtelivat 4–6 tunnin välillä.

Kampusalueella on oma sisäinen kaukolämpöverkko, joka on Alvan kaukolämmön päämittauksen takana. Alueella on noin kymmenkunta kiinteistöä, joista kolme oli mukana pilotoinnissa. Tuloksia tarkastellessa on huomioitava joustojen piiriin kuulumattomien kiinteistöjen tasoittava vaikutus. Referenssinä käytettiin vuoden 2017 ja 2018 energian kulutustietoja joustoja vastaavilta tunneilta. Kiinteistökohtaisia analyyseja varten tarvittavaa referenssidataa saatiin vaihtelevasti kampusmanagerina toimivalta yritykseltä. Opinnäytetyössä kyseistä kampusaluetta tarkastellaan kokonaisuutena.

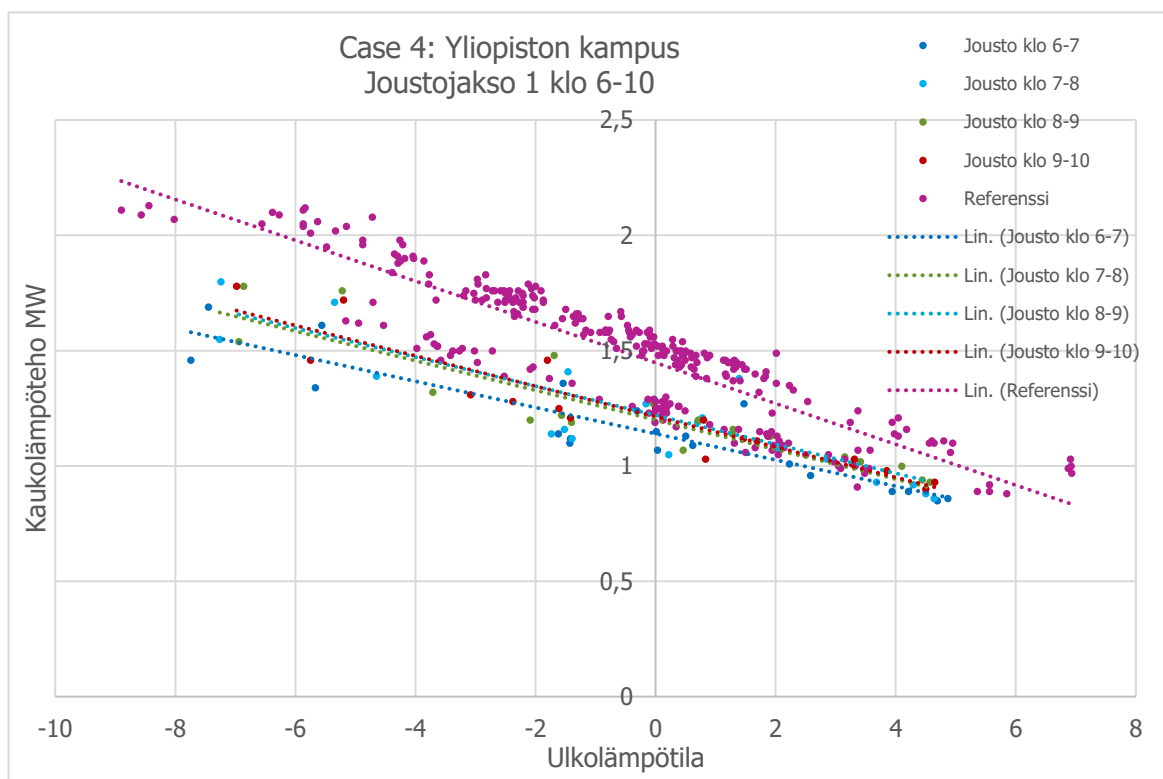


KUVA 25. Kiinteistön kaukolämpöenergian prosentuaalinen kulutus vuorokauden tunneille jaettuna



KUVA 26. Energiankulutuksen summakäyrän profilista on havaittavissa joustotapahtuma sekä jouston päättymisen jälkeinen kulutuspiikki, 5.12.2019- 3.1.2020

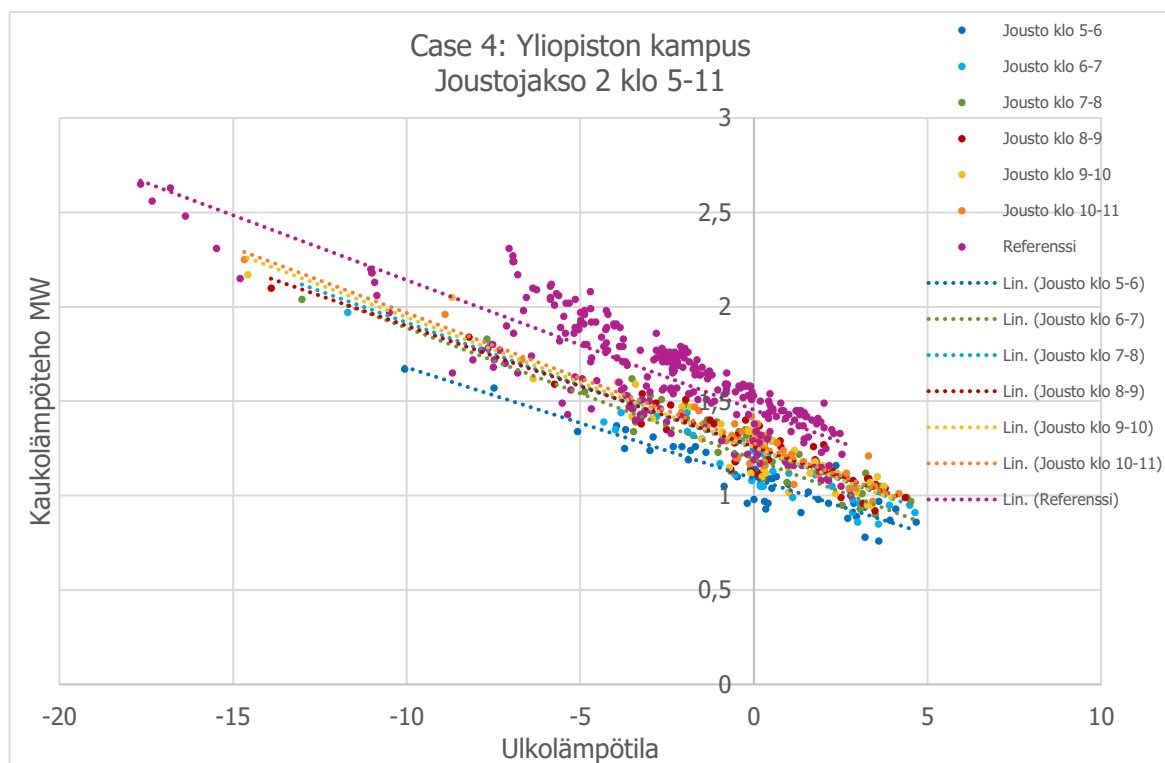
Kiinteistöjen joustot ajoitettiin kaukolämmön kulutusprofiilin mukaan eniten kuluttaville tunneille (kuva 25). Kohteiden joustokäskyt välittyivät etävalvonnan kautta rakennusten automaatiojärjestelmään, johon on ohjelmituna muutokset, jotka tapahtuvat joustokäskyn tullessa päälle. Kuvasta 26 on havaittavissa jouston jälkeisen kulutuspiikin syntyminen. Kohteiden kysyntäjouston arkkitehtuurin takia lämmitysverkostojen muutosnopeuksia ei päästy muokkaamaan, vaan ohjelmointityö olisi pitänyt tilata paikalliselta urakoitsijalta, joka kohteen automaation on tehnyt.



KUVA 27. Case 4: Joustojakso 1, klo 6–10, 15.11.2019- 4.12.2019

Kohteessa oli aikaisemmin suoritettu lyhyempiä kahden tunnin mittaisia joustoja. Jouston pituudet nostettiin ensimmäisen joustojakson aikana neljään tuntiin ja seuraavassa jaksossa kuuteen tuntiin. Pidempien joustojen avulla pystyttiin seuraamaan kiinteistöjen sisäolosuhteiden muuttumista joustojen vaikutuksesta. Kiinteistöihin asennettujen kosteus- ja lämpötila-antureiden datasta havaittiin vain pieniä lämpötilan muutoksia joustojen aikaan. Hiilidioksidipitoisuuksissa ei ollut merkittävää nousua joustojen vaikutuksesta.

Kuvista 27 ja 28 on havaittavissa tyypillinen joustotapahtuma, kun verkostojen menoveden lämpötilaa pudotetaan vain vähän. Ensimmäinen joustotunti on teholtaan suurempi kuin seuraavat. Kyseisen tapahtuman arveltiin johtuvan siitä, että lämmitysjärjestelmän kaukolämpöventtiili sulkeutuu jouston alkaessa hetkellisesti. Kun verkostojen menoveden lämpötila on saavuttanut uuden asetusarvonsa, kaukolämpöventtiili lähtee hiljalleen avautumaan pitääkseen menoveden lämpötilan uudessa asetusarvossaan.



KUVA 28. Case 4: Joustojakso 2, klo 5–11, 5.12.2019- 20.1.2020

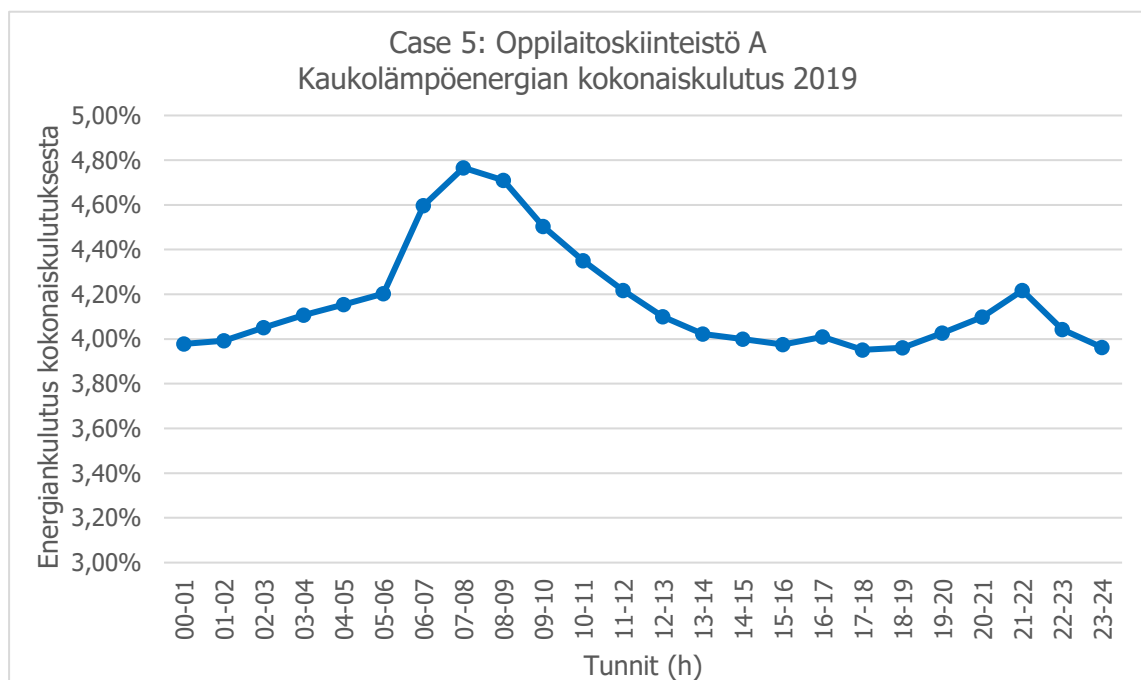
## 5.5 Case 5: Oppilaitoskiinteistöt A & B

Kahdessa Jyväskylän koulutuskuntayhtymän ammatillisessa oppilaitoksessa suoritettiin kysyntäjoustopilotointia vuoden 2020 tammikuusta huhtikuuhun. Kiinteistö A on valmistunut vuonna 1987 ja on rakennustilavuudeltaan 88 000 m<sup>3</sup>. Ominaiskulutus on vuoden 2019 energiankulutuksella 50 kWh/m<sup>3</sup>. Kiinteistö B on valmistunut vuonna 1962 ja on rakennustilavuudeltaan 79 893 m<sup>3</sup>. Ominaiskulutus on vuoden 2019 energiankulutuksella 55,3 kWh/m<sup>3</sup>. Pilottiin osallistui molemmissa kiinteistöissä vain patteriverkostoja, kiinteistön A osalta viisi lämmönsiirintä ja B osalta kolme siirintä. Kysyntäjoustopilotoinnin järjestelmätöimittajalla ei ollut antaa tarkkaa tietoa lämmönsiirtimien vaikutusalueista. Nimellistehoiltaan siirtimien tehot vaihtelevat 100–1000 kW välillä.

Joustokäskyt annettiin aikaohjatusti etävalvontajärjestelmän kautta. Kohteissa oli mahdollista joustaa vain kaksi tuntia kerrallaan, suoja-aika joustojen välillä oli tunti. Etävalvontajärjestelmästä oli käyttäjän luettavissa vain jouston tilatieto. Käyttäjän oli mahdollista säätää patteriverkostojen menoveden lämpötilan pudotusta lämmönsiirrin kohtaisesti. Vain yhdestä siirtimestä oli saatavilla hetkellisen tehon trendi. Kaikista mukana olleista siirtimistä oli käytössä joustohistoria- trendi, minkä avulla pystyi tarkkailemaan joustojen onnistumisia. Kohteisiin ei erikseen asennettu lämpötilantureita, vaan takaisinkytkentä oli ohjelmoitu seuraamaan eri patteriverkostojen vaikutusalueilla toimivien ilmanvaihtokoneiden poistoilman lämpötilan muutosta. Jo -1 °C muutos poistoilman lämpötilassa katkaisisi jouston. Tästä muodostui ongelmia joustojen onnistumisessa sekä

joustotehojen määrittämisessä, sillä joustotehoja oli arvioitava kokonaisuutena. Joustojen katketessa takaisinkytkennän ohjaamana menoveden lämpötila pyrkii palautumaan hyvin nopeasti takaisin alkuperäiseen asetusarvoonsa, aiheuttaen piikin hetkelliseen tehoon.

Muutamissa lämmönsiirtimissä oli havaittavissa joustojaksojen aikana tätä ongelmaa. Asiaa selvittäneen huoltomiehen mukaan näiden siirtimien iv-koneiden vaikutusalueella olisi pidetty ulko-ovia auki, jonka takia poistoilman lämpötila on muuttunut yli - 1°C, aiheuttaen jouston katkeamisen. Joustojen katketessa menoveden lämpötilan palautumista ei ole hallittu lainkaan. Useamman lämmönsiirtimen jouston katketessa jälkipiikin vaikutus aiheuttaa ongelmia tulosten analysointiin, epäonnistuneet joustot on karsittu tuloksista pois.



KUVA 29. Kiinteistön kaukolämpöenergian prosentuaalinen kulutus vuorokauden tunneille jaettuna



KUVA 30. Oppilaitoskiinteistö A:n patteriverkoston hetkellisen tehon trendi

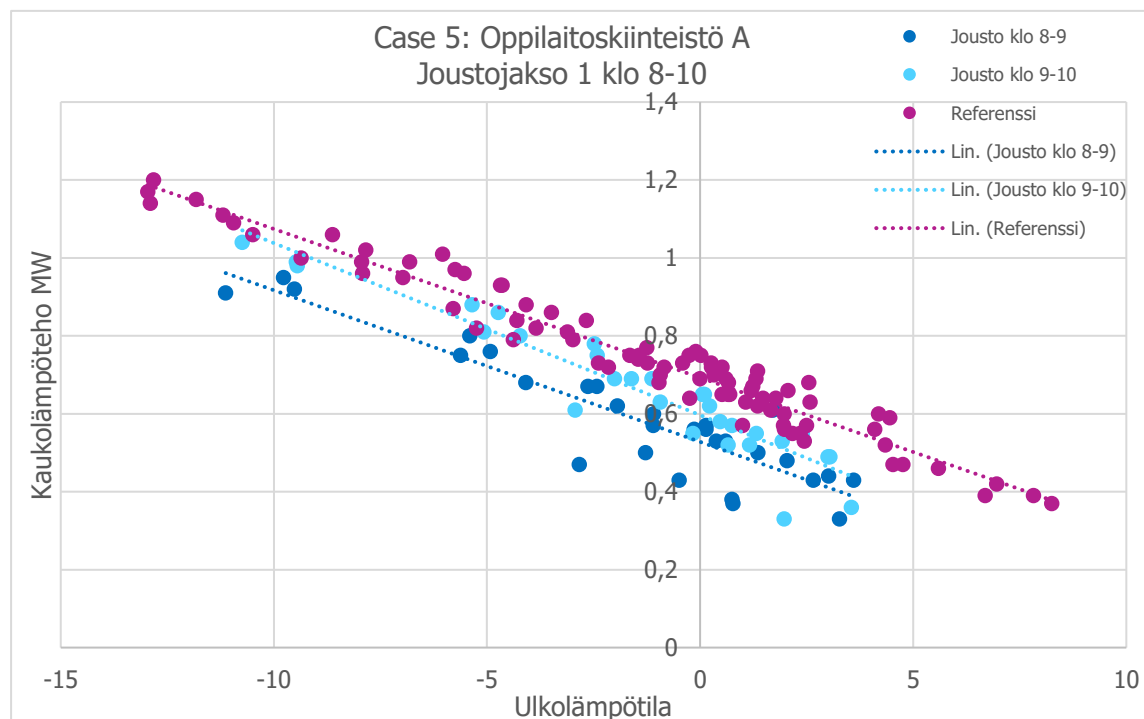
Kuvassa 30 näkyvä tilanne on kiinteistön A:n patteriverkoston iltajoustosta klo 20–22, jossa pudotetaan menoveden lämpötilaa  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Ulkolämpötila on tapahtumahetkellä  $3,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Y-akselilla on teho, kilowatteina (kW) ja x-akselilla aika. Jousto katkeaa jo ensimmäisen joustotunnin aikana todennäköisesti takaisinkytkennän ohjaamana, aiheuttaen tehontarpeeseen jyrkän jälkipiikin.



KUVA 31. Oppilaitoskiinteistö A:n patteriverkoston hetkellisen tehon trendi

Kuvassa 31 on vastaava tilanne eri päivältä, jossa pudotetaan patteriverkoston menoveden lämpötilaa  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Ulkolämpötila on tapahtumahetkellä  $6,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Y-akselilla on teho, kilowatteina (kW) ja x-akselilla aika. Kuvassa näkyy onnistuneen jouston päättymisen jälkeisen menoveden lämpötilan hallittu palautuminen, mistä syystä jälkipiikkiä ei muodostu. Menoveden lämpötilan muutosnopeutta haettiin pilotissa oikeanlaiseksi muutamaan otteeseen, jälkipiikin välttämiseksi. Käyttäjä ei pystynyt muokkaamaan muutosnopeutta vaan järjestelmätoimittajan yhteyshenkilön täytyi tehdä tämä.

Seuraavissa kuvissa on arvioitu kiinteistökohtaista joustopotentialiaa eri ulkolämpötiloissa joustotehona sekä prosentuaalisesti (verrattuna referenssiin). Kuvissa mittapisteet ovat joustoajan tuntitason energiankulutus eli teho. Mittapisteitä ollessa tarpeeksi paljon, on voitu niiden perusteella tehdä lineaarinen sovite. Tämän sovituksen avulla on kuvaajien alla esitettyyn taulukkoon arvioitu joustoteho ja jouston prosentuaalinen osuus hetkellisestä tehosta eri ulkolämpötiloissa.



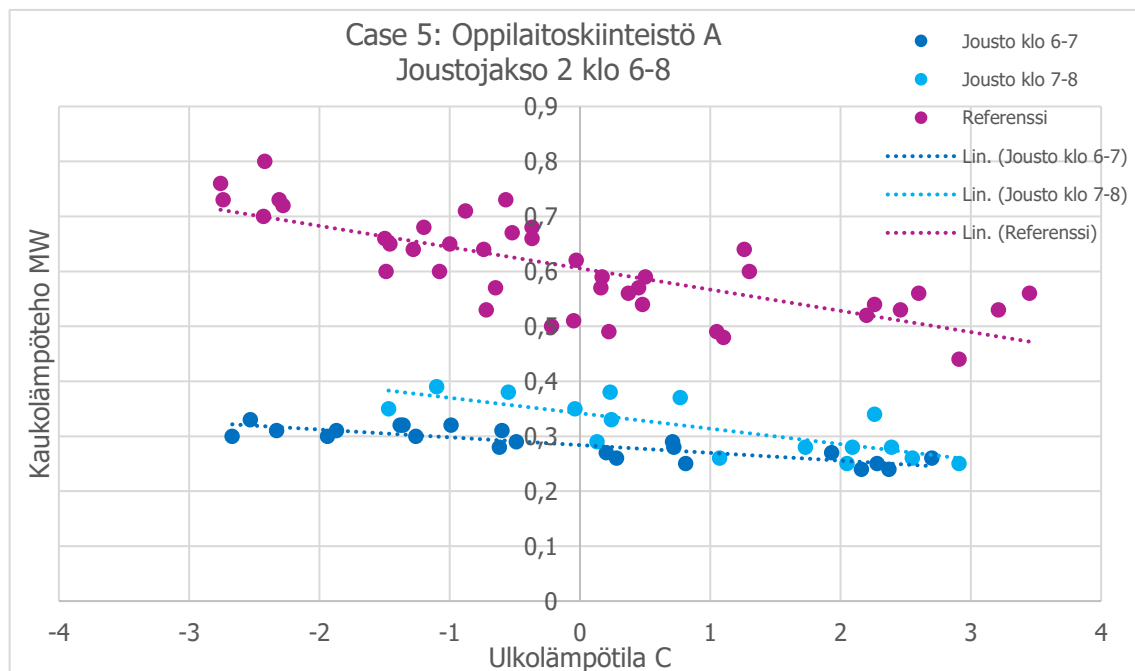
KUVA 32. Case 5: Joustojakso 1, klo 8–10, 7.1- 24.2.2020

Oppilaitoskiinteistö A:n ensimmäiset joustot ajoitettiin kello 8–10 välille. Kohteessa pudotettiin patteriverkostojen menoveden lämpötilaa sen hetkisestä lämpötilasta  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Kuvasta 32 on havaittavissa samantyyppinen tilanne kuin muissa pilottikohteissa, joissa jouston asetusarvo on pieni. Kaukolämpöventtiili sulkeutuu ensimmäisen tunnin aikana hetkellisesti. Menoveden lämpötilan saavuttaessaan uuden asetusarvon, kaukolämpöventtiili avautuu vähitellen pitääkseen menoveden lämpötilan halutussa asetusarvossa. Taulukosta 6 havaitaan ensimmäisen tunnin joustotehon olevan huomattavasti suurempi kuin seuraavan tunnin.



TAULUKKO 6. Case 5: Joustojakso 1, arvioitu joustopotentialiaali klo 8–10, 7.1- 24.2.2020

Ulkolämpötila	Joustoteho (kW) klo 8–9	Joustoteho (kW) klo 9–10	Klo 8-9	Klo 9-10	Hetk. teho kW keskimäärin
5	168	126	34 %	25 %	502
0	165	96	24 %	14 %	693
-5	161	66	18 %	8 %	884
-10	158	37	15 %	3 %	1075
-15	154	7	12 %	1 %	1266



KUVA 33. Case 5: Joustojakso 2 klo 6–8, 6.4- 30.4.2020

Seuraavassa joustojaksossa patteriverkoston menoveden lämpötilaa pudotettiin sen hetkisestä lämpötilasta – 20 °C. Joustojen ajoitusta muutettiin kulutusprofiilin mukaan niille aamutunneille, joilla kaukolämmön kulutus oli suurinta. Oikea-aikaisesti ajoitetulla joustolla huomattava merkitys joustotehon aikaansaamiseksi. Kuvan 33 mukaisesti kyseisessä kohteessa ensimmäiselle tunnille saatiin hieman suurempi joustoteho kuin seuraavalle. Kiinteistön sisäolosuhteita ei ollut mahdollista pilotin aikana seurata. Nähtiin kuitenkin, että – 20 °C asetusravon muutos ei johtanut merkittäviin sisäolosuhteiden muuttumisiin. Joustojen takaisinkytkentä reagoi herkästi esim. ulko-ovien avaamiseen, jolloin jousto saattoi kytkeytyä pois päältä. Kyseiset tapahtumat näyttäytyvät taulukossa 6 pienempänä joustotehona.

TAULUKKO 7. Case 5: Joustojakso 2, arvioitu joustopotentialiaali klo 6–8, 6.4- 30.4.2020

Ulkolämpötila	Joustoteho (kW) klo 6–7	Joustoteho (kW) klo 7–8	% klo 6–7	% klo 7–8	Hetk. teho kW keskimäärin
5	199	211	48 %	51 %	412
0	322	264	53 %	44 %	605
-5	444	316	56 %	40 %	798
-10	567	369	57 %	37 %	991
-15	689	421	58 %	36 %	1184

## 6 YHTEENVETO

Opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää kaukolämmön kysynnän jouston pilotoinnin avulla teknisesti ja taloudellisesti kestäviä ratkaisuja ja menetelmiä sen toteuttamiseen Alvan kaukolämpöverkossa. Pilotointia toteutettiin viidessä erilaisessa kohteessa neljän eri järjestelmätoimittajan kanssa. Pilotointia voidaan pitää siinä mielessä onnistuneena, että jokaisen järjestelmätoimittajan kanssa saatiin lämpötehon leikkausta aikaiseksi. Opinnäytetyössä pilotoitujen kiinteistöjen kysynnän jouston toteutustapa vaihteli eri järjestelmätoimijoiden välillä. Osan kanssa yhteistyö sujui toisia paremmin, myös järjestelmien ongelmiin ja epäkohtiin puututtiin vaihtelevasti toimijoiden välillä. Yhden järjestelmätoimittajan kysyntäjouston toteutustapa oli selkeästi muita edellä, vaikkakin vaatii edelleen paljon kehittämistä. Suurimpina ongelmina piloteissa koettiin kysyntäjouston päättyessä hetkellisen tehon voimakas kasvu ns. jälkipiikin syntyminen. Kahden järjestelmätoimittajan kanssa saatiin haitallisen jälkipiikin muodostuminen estettyä, muuttamalla jouston päättymisen jälkeisen menoveden lämpötilan muutosnopeutta. Pahimmillaan huonosti toteutettu kysyntäjousto voisi jopa kasvattaa asiakkaan huipputehoa.

Pilotoitavien kohteiden sisäolosuhteita seurattiin eri menetelmin. Osaan asennettiin lämpötila- ja kosteusantureita, kun toisten olosuhteita seurattiin poistoilman lämpötilasta. Järjestelmätoimittajien tavoissa toteuttaa joustojen takaisinkytkentä, oli myös eroja. Oppilaitoskiinteistöjen joustot katkesivat luvattoman usein takaisinkytkennän takia, sen oli tarkoitus katkaista joustot, mikäli iv-koneiden vaikutusalueiden poistoilmanlämpötila tippuisi alle määritellyn tason. Osa katkenneista joustoista johtuivat kohteen huoltomiehen mukaan siitä, kun ulko-ovia pidettiin auki. Oppilaitoskiinteistöjen etävalvontajärjestelmä, josta joustoja pystyi hallitsemaan, oli sisäolosuhdeseurantaan riittämätön, näin ollen joustojen vaikutus sisäolosuhteisiin jäi osittain epäselväksi. Kohteissa, joissa oli lämpötila- ja kosteusantureita sekä riittävä etävalvontajärjestelmä niiden seurantaan, havaittiin pilotin aikana joustojen vaikuttavan huoneistojen sisälämpötilaan suurimmillaan n. -1 °C verran. Huomioitavaa on, että sisälämpötilat eivät laskeneet kertaakaan suositeltujen lämpötilojen alle, vaan suurimmat lämpötilan muutokset tapahtuivat ”ylilämmitetyissä” asunnoissa. Toisaalta lämmityskauden 2019–2020 leudolla säällä saattaa olla vaikutusta asiaan.

Muutamassa kohteessa tarkasteltiin joustettavien tuntien kaukolämmön paluuveden lämpötilaa. Kiinteistöjen joutaessa oli havaittavissa kaukolämmön paluuveden lämpötiloissa nousua, etenkin niillä hetkillä, kun lämpimän käyttöveden kulutus oli vähäistä. Paluuveden lämpötilan nousu rajoittuu kuitenkin vain joustettaville tunneille ja riippuu paljon samanaikaisesti käytettävästä lämpimän käyttöveden määrästä. Jos käyttöveden kulutus on suurta, jää paluuveden lämpötilan nousu vähäiseksi. Monet yritykset, jotka tarjoavat kysyntäjousto- palvelua lupaavat kaukolämmön paluuveden lämpötilojen laskevan.

Tuloksista selviää kohdekohtaisesti arviot kunkin kiinteistön joustettavan tehon suuruudesta kilowatteina sekä prosentuaalinen osuus hetkellisestä kokonaistehosta. Pilotin tulokset perustuvat tuntikohtaisesti mitattuihin tehoihin sekä aiempien vuosien joustojen vastaavilta tunneilta käytettyyn referenssidataan, joten ne ovat parhaillaankin vain arvioita joustettavasta tehosta. Tarkempi joustettavan tehon arviointi vaatisi lämmitysjärjestelmien ja lämpimän käyttöveden erillisiä mittauksia.

Tuntikohtaisesti tarkasteltaessa muutaman tunnin joustoja, oli tuloksista havaittavissa yhdenmukaisuus lähes jokaisen kohteen kohdalla. Kun toisiopuolen menoveden lämpötilaa rajoitettiin vain  $-12\text{ °C}$  tai vähemmän, ensimmäinen tunti joustaa enemmän kuin seuraava. Tämän nähtiin johtuvan joustojen ohjausalgoritmin toiminnasta, lämmitysverkoston menoveden lämpötila saavuttaa uuden asetusarvonsa ensimmäisen joustotunnin aikana, jonka jälkeen kaukolämmön säätöventtiili lähtee hiljalleen avautumaan pitääkseen lämmitysverkoston menoveden lämpötilan uudessa asetusarvossaan. Kun lämpötilaa rajoitettiin  $-20\text{ °C}$  tai enemmän, ei tätä kyseistä ongelmaa enää ollut havaittavissa. Lämmitysverkoston menoveden lämpötila ei pääse uuteen asetusarvoonsa muutaman tunnin mittaisen jouston aikana ja näin ollen saadaan molemmilta tunneilta samansuuruiset joustot.

Pilotissa mukana olleiden kiinteistöjen joustopotentialia vaihtelee ulkolämpötilan sekä joustoissa käytettyjen asetusarvojen mukaan. Jos pilotissa mukana olleet kiinteistöt ajoitettaisiin joustamaan ulkolämpötilan ollessa  $-5\text{ °C}$  samoina aamutunteina, olisi tulosten perusteella joustotehojen yhteenlaskettu summa jopa noin 1,6 MW.

Alvan kaukolämpöverkossa tulisi olla joustettavaa tehoa vähintään 5–10 MW, jotta merkittäviä tuotannon hyötyjä voitaisiin odottaa. Jatkoa ajatellen kysyntäjoustoa olisi hyvä pilotoida vieläkin laajemmassa mittakaavassa, jotta nähtäisiin mahdolliset vaikutukset Alvan tuotantoon ja sitä kautta tekemään laskelmia, kuinka paljon on kannattavaa investoida kysyntäjoustojärjestelmiin. Kiinteistön joustettavan tehon tarkka määrittäminen nähtiin Alvalla erityisen tärkeänä, jos kysyntäjoustoa tulitisiin toteuttamaan laajemmassa mittakaavassa. Myös jouston piiriin saatavien kiinteistöjen kaukolämmön kulutuksen ennuste olisi saatava riittävälle tasolle. Tällöin pystyttäisiin pienentämään tuotannon ohjauksen ennuste epävarmuutta sekä optimoimaan kaukolämmön menoveden lämpötilaa.

## LÄHDELUETTELO

Alva-Yhtiö Oy 2020. Yhtiö. Historia ja nykyhetki. <https://www.alva.fi/alva/yhtio/>. Viitattu 14.4.2020

Alva-Yhtiö Oy 2020. Yhtiö. Yhteiskuntavastuu. Yhteiskuntavastuuraportit. JE yhteiskuntavastuuraportti 2018. Pdf-tiedosto. <https://www.alva.fi/app/uploads/1/2020/01/JE-yhteiskuntavastuuraportti-2018.pdf>. Viitattu 13.4.2020

Alva-Yhtiöt Oy N.d. Yrityksen sisäinen materiaali intranetissä. Viitattu 14.4.2020

Energiateollisuus ry. Kaukolämpötilasto. Kaukolämpötilasto 2018. Pdf-tiedosto. <https://energia.fi/files/3935/Kaukolampotilasto2018.pdf>. Viitattu 12.5.2020

Energiateollisuus ry. Kaukolämpötilasto. Kaukolämpötilasto 2019 graafeina. [https://energia.fi/files/3936/Kaukolampo\\_2019.pptx](https://energia.fi/files/3936/Kaukolampo_2019.pptx). Viitattu 11.5.2020

Energiateollisuus ry. Kaukolämpöalan strategia. 2013. Pdf-tiedosto. [https://www.adato.fi/wp-content/uploads/2019/09/Kaukol\\_strategia\\_FI.pdf](https://www.adato.fi/wp-content/uploads/2019/09/Kaukol_strategia_FI.pdf). Viitattu 2.4.2020

Energiateollisuus ry. Suositus K15/2014. Teho ja vesivirta kaukolämmön maksuperusteina. 2014. Pdf-tiedosto. [https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwi\\_jsPXufoAhUVwsQBHV5PCO0QFjAAegQIARAB&url=https%3A%2F%2Fenergia.fi%2Ffiles%2F586%2FTeho\\_ja\\_vesivirta\\_SuositusK15\\_2014.pdf&usg=AOvVaw33UP0oDGTB6gEJccMyjZAw](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwi_jsPXufoAhUVwsQBHV5PCO0QFjAAegQIARAB&url=https%3A%2F%2Fenergia.fi%2Ffiles%2F586%2FTeho_ja_vesivirta_SuositusK15_2014.pdf&usg=AOvVaw33UP0oDGTB6gEJccMyjZAw). Viitattu 8.5.2020

Energiateollisuus ry. Julkaisu K1/2013. Rakennusten kaukolämmitys. Määräykset ja ohjeet. 2013. Pdf-tiedosto. [https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwiw\\_\\_fTfoAhVKaJoKHf3MANYQFjAAegQIAhAB&url=https%3A%2F%2Fenergia.fi%2Ffiles%2F502%2FJulkaisuK1\\_2013\\_20140509.pdf&usg=AOvVaw2AHi0a4Dv7AuUnK0\\_xp1D6](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwiw__fTfoAhVKaJoKHf3MANYQFjAAegQIAhAB&url=https%3A%2F%2Fenergia.fi%2Ffiles%2F502%2FJulkaisuK1_2013_20140509.pdf&usg=AOvVaw2AHi0a4Dv7AuUnK0_xp1D6)

Energiateollisuus ry. Kaukolämpöverkot. n.d. <https://energia.fi/energiasta/energiaverkot/kaukolampoverkot>

Gadd, H & Werner, S. 2012. Daily heat load variations in Swedish district heating systems. School of Business and Engineering. Halmstad University. [https://www.researchgate.net/publication/257157774\\_Daily\\_Heat\\_Load\\_Variation\\_in\\_Swedish\\_District\\_Heating\\_Systems](https://www.researchgate.net/publication/257157774_Daily_Heat_Load_Variation_in_Swedish_District_Heating_Systems). Viitattu 22.9.2020

Holmqvist, V. 2018. Toimintamalli kysyntäjouaston toteuttamiseksi asuinkerrostalossa. Opinnäytetyö (YAMK).

[https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/155244/Holmqvist\\_Victor\\_Opinnaytetyo\\_YAMK.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/155244/Holmqvist_Victor_Opinnaytetyo_YAMK.pdf?sequence=1&isAllowed=y). Viitattu 5.5.2020

Kaukolämmön asema Suomen energiajärjestelmässä tulevaisuudessa. Työ- ja elinkeinoministeriö. Energiateollisuus ry. Loppuraportti 2011. Pöyry Management Consulting Oy. Pdf-tiedosto.

<https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwj0-NKE4unvAhXDIYsKHTJaC24QFjABegQIAHAD&url=http%3A%2F%2Fwww2.energia.fi%2Fkaukolamp%2Fklasemaloppuraportti52a14971.pdf&usg=AOvVaw30nFsnJGUT8pmOcjLUxfCj>. Viitattu 9.6.2020

Koskelainen, Saarela ja Sipilä. Kaukolämmön käsikirja. 2006. Energiateollisuus. Helsinki: Kirjapaino Libris.

Kärkkäinen, S., Sipilä, K., Pirvola, L., Esterinen, J., Eriksson, E., Soikkeli, S., Nuutinen, M., Aarnio, H., Schmitt, F., Eisgruber, C. 2004. Demand side management of the district heating systems. VTT.

[https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjXnZS8ppzpAhVCr4sKHUBvDOWQFjAAegQIARAB&url=https%3A%2F%2Fwww.vtt.fi%2Ffin%2Fpdf%2Ftiedotteet%2F2004%2FT2247.pdf&usg=AOvVaw0N\\_P9\\_jQ7rXLT\\_ZYOnGCrN](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjXnZS8ppzpAhVCr4sKHUBvDOWQFjAAegQIARAB&url=https%3A%2F%2Fwww.vtt.fi%2Ffin%2Fpdf%2Ftiedotteet%2F2004%2FT2247.pdf&usg=AOvVaw0N_P9_jQ7rXLT_ZYOnGCrN). Viitattu 5.5.2020

Manninen, A-K. 2014. Kaukolämmön tuotantoa ja kulutusta tasapainottavat liiketoimintamallit.

Diplomityö. Oulun yliopisto. <http://jultika.oulu.fi/files/nbnfioulu-201412032058.pdf>. Viitattu 26.4.2020

Manninen, K. 2017. Rakennuksen kysyntäjoustromallinnuksen vaatimusten määrittäminen. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto.

[https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/134517/Diplomityo\\_Manninen\\_Kreetta.pdf?sequence=2&isAllowed=y](https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/134517/Diplomityo_Manninen_Kreetta.pdf?sequence=2&isAllowed=y). Viitattu 4.5.2020

Motiva. Kaukolämpö. n.d.

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

Mäkelä ja Tuunanen. Suomalainen kaukolämmitys. 2015. Mikkelin ammattikorkeakoulu. Mikkelä. Pdf-tiedosto.

<https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/97138/URNISBN9789515885074.pdf?sequence=1>

Pesola A, Bröckl M & Vanhanen J. 2011. Gaia Consulting Oy. Älykäs kaukolämpöjärjestelmä ja sen mahdollisuudet. Loppuraportti. Pdf-tiedosto.

<https://docplayer.fi/storage/24/2848107/1588060397/iAaITjXuAjqnzFySKv349A/2848107.pdf>.

Viitattu 28.4.2020

Salo, S. 2016. Predictive Demand-side Management in District Heating and Cooling Connected Buildings. Diplomityö. Aalto-yliopisto. Espoo.

[https://aaltodoc.aalto.fi/bitstream/handle/123456789/22197/master\\_Salo\\_Sonja\\_2016.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://aaltodoc.aalto.fi/bitstream/handle/123456789/22197/master_Salo_Sonja_2016.pdf?sequence=1&isAllowed=y). Viitattu 30.3.2020

Sandberg, A. 2017. Sähkön ja lämmön tehokkaan yhteistuotannon sekä kaukolämmityksen ja -jäähdytyksen raportoinnin suunnittelu. Diplomityö.

[https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwiD3eq1s4XuAhUHCBAIHfPGBJkQFjAAegQIBBAC&url=https%3A%2F%2Faaltodoc.aalto.fi%2Fbitstream%2Fhandle%2F123456789%2F29384%2Fmaster\\_Sandberg\\_Aleksi\\_2017.pdf%3Fsequence%3D1%26isAllowed%3Dy&usg=AOvVaw2hpsgVjNeHCrXFnL7LxjAM](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwiD3eq1s4XuAhUHCBAIHfPGBJkQFjAAegQIBBAC&url=https%3A%2F%2Faaltodoc.aalto.fi%2Fbitstream%2Fhandle%2F123456789%2F29384%2Fmaster_Sandberg_Aleksi_2017.pdf%3Fsequence%3D1%26isAllowed%3Dy&usg=AOvVaw2hpsgVjNeHCrXFnL7LxjAM). Viitattu 25.3.2020

Salokoski, P. 2017. Tekes. Tulevaisuuden energia 2030...2050.

[https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=3&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwiv0LKJ1IrpAhWfW4sKHQ9YDjAQFjACegQIBBAC&url=https%3A%2F%2Fwww.businessfinland.fi%2Fglobalassets%2Fjulkaisut%2Ftulevaisuuden-energia\\_2030\\_2050\\_332\\_2017.pdf&usg=AOvVaw2mL6hDB5bkn9ze-HqD4wij](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=3&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwiv0LKJ1IrpAhWfW4sKHQ9YDjAQFjACegQIBBAC&url=https%3A%2F%2Fwww.businessfinland.fi%2Fglobalassets%2Fjulkaisut%2Ftulevaisuuden-energia_2030_2050_332_2017.pdf&usg=AOvVaw2mL6hDB5bkn9ze-HqD4wij). Viitattu 28.4.2020

Tilastokeskus. Energia 2018- taulukkopalvelu. Rakennusten lämmitys. Asuin- ja palvelurakennusten lämmityksen hyötyenergia.

[https://pxhopea2.stat.fi/sahkoiset\\_julkaisut/energia2018/data/t07\\_02.xls](https://pxhopea2.stat.fi/sahkoiset_julkaisut/energia2018/data/t07_02.xls). Viitattu 28.4.2020

Timonen, J. 2018. Kaukolämmön kysyntäjousto kaukolämpötoimijoiden näkökulmasta. Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto.

<https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjI59KgyZzpAhVCKMMKHeSABBCQFjAAegQIBBAC&url=https%3A%2F%2Flutpub.lut.fi%2Fhandle%2F10024%2F158708&usg=AOvVaw1ZhqyO6UWvHy2Pr14jvSw>. Viitattu 5.5.2020

Työ- ja elinkeinoministeriö. Valtioneuvoston selonteko kansallisesta energia- ja ilmastostrategiasta vuoteen 2030. Riku Huttunen 2017. Pdf-tiedosto.

<https://valtioneuvosto.fi/documents/1410877/3506436/Valtioneuvoston+selonteko+kansallisesta+energia-+ja+ilmastostrategiasta+vuoteen+2030.pdf>. Viitattu 2.4.2020

Valor Partners, 2015. Kaukolämmön kysyntäjousto. Energiateollisuus Ry. Pdf-tiedosto.

[https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=2ahUKEwiLyeLSvorpAhURmIsKHWPSDLcQFjAAegQIAxAB&url=https%3A%2F%2Fenergia.fi%2Ffiles%2F439%2FKaukolammmon\\_kysyntajousto\\_loppuraportti\\_VALOR.pdf&usg=AOvVaw0i-eyiNG3oZa8SdHxm57I-](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=2ahUKEwiLyeLSvorpAhURmIsKHWPSDLcQFjAAegQIAxAB&url=https%3A%2F%2Fenergia.fi%2Ffiles%2F439%2FKaukolammmon_kysyntajousto_loppuraportti_VALOR.pdf&usg=AOvVaw0i-eyiNG3oZa8SdHxm57I-). Viitattu 28.4.2020

Älykäs kaupunkienergia. Raportti energiateollisuus ry:lle. Kesäkuu 2018. Pöyry Management Consulting Oy. Pdf-tiedosto.

[https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwiU\\_NPh4unvAhUCmYsKHUyIBMkQFjAAegQIBRAD&url=https%3A%2F%2Fenergia.fi%2Ffiles%2F2862%2FAlykas\\_kaupunkienergia\\_LOPPURAPORTTI\\_20180614.pdf&usg=AOvVaw1IVpjrPGyZaZ-plmpLONBu](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwiU_NPh4unvAhUCmYsKHUyIBMkQFjAAegQIBRAD&url=https%3A%2F%2Fenergia.fi%2Ffiles%2F2862%2FAlykas_kaupunkienergia_LOPPURAPORTTI_20180614.pdf&usg=AOvVaw1IVpjrPGyZaZ-plmpLONBu).

Viitattu 22.4.2020