



KAUKOLÄMMÖN KYSYNTÄJOUSTON VAIKUTUSTEN ARVIOINTI LAP- PEENRANNAN KAUKOLÄMPÖVERKOSTOSSA

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Energiatekniikan diplomityö

2025

Sanni Knaapi

Tarkastajat: Professori Esa Vakkilainen

Tutkijatohtori Jussi Saari

Ohjaaja: Diplomi-insinööri Rami Koivula

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

School of Energy Systems

Energiatekniikka

Sanni Knaapi

Kaukolämmön kysyntäjoustopilotin vaikutusten arviointi Lappeenrannan kaukolämpöverkostossa

Energiatekniikan diplomityö

2025

55 sivua, 20 kuvaa ja 3 taulukkoa

Tarkastaja(t): Professori Esa Vakkilainen ja Tutkijatohtori Jussi Saari

Avainsanat: kaukolämpö, kysyntäjousto, energiatehokkuus

Diplomityö tarkastelee kaukolämmön tulevaisuudennäkymiä suomalaisessa lämmitysjärjestelmässä sekä kysyntäjoustopilotin teoriaa ja käytännön vaikutuksia Lappeenrannan Energian kaukolämpöverkossa toteutetun kysyntäjoustopilotin avulla.

Työssä havaittiin, että kysyntäjoustopilotin hyödyntäminen voi merkittävästi tehostaa kaukolämpöverkon toimintaa, vähentää lämmöntuotannon päästöjä ja pienentää siitä aiheutuvia kustannuksia niin tuottajille kuin asiakkaille. Erityisesti alajoustopilotin todettiin vähentävän verkon lämpökuormitusta, mahdollistavan energiansäästöjä sekä tukevan uusiutuvan energian käyttöä fossiilisten polttoaineiden sijaan. Kysyntäjoustopilotin vaikutuksia arvioitiin energiankulutuksen, sähkömarkkinahintojen ja päästöintensiteetin perusteella, mikä mahdollisti ilmiön tarkastelun sekä teknisestä että taloudellisesta näkökulmasta. Tulokset tukevat joustopilotin käyttöönottoa osana energijärjestelmän vihreää siirtymää ja kaukolämmön kestävästi kehittämistä.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

School of Energy Systems

Energy Technology

Sanni Knaapi

Assessment of the effects of district heating demand response in the Lappeenranta district heating network

Master's thesis

2025

55 pages, 20 figures and 3 tables

Examiners: Professor Esa Vakkilainen and Post-doctoral researcher Jussi Saari

Keywords: district heating, demand response, energy efficiency

This Master's thesis explores the future prospects of district heating in the Finnish energy system, focusing on the theory of demand response and the evaluation of a demand response pilot implemented in the Lappeenranta Energy's district heating network.

The study found that utilizing demand response can significantly improve the efficiency of district heating operations, reduce emissions from heat production, and lower associated costs for both producers and consumers. Load reduction was shown to decrease thermal load in the network, enable energy savings, and support the increased use of renewable energy in place of fossil fuels. The impacts of demand response were assessed based on energy consumption, electricity market prices, and emission intensity, providing a comprehensive analysis from both technical and economic perspectives. The findings support the integration of flexibility mechanisms as part of the green transition and the sustainable development of district heating systems.

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

1	Johdanto.....	6
2	Kaukolämpö lämmitysmuotona.....	8
2.1	Kaukolämmön tuotanto ja jakelu.....	8
2.2	Kaukolämmön tuotannossa käytetyt polttoaineet.....	9
2.3	Kaukolämpö Suomessa.....	13
2.3.1	Kaukolämpö Lappeenrannassa.....	17
2.4	Tulevaisuuden kaukolämpöjärjestelmä.....	17
2.4.1	Uusiutuvan energian edistäminen.....	18
2.4.2	Hukkalämpöjen potentiaali kaukolämpöjärjestelmissä.....	19
2.4.3	Sektor-integraatio.....	20
2.4.4	Kaksisuuntainen kaukolämpöverkko.....	22
2.4.5	Matalalämpöinen kaukolämpö.....	23
2.4.6	Kaukolämpö- ja sähkömarkkinan yhteydet ja joustopotentiaali.....	24
2.4.7	Kaukolämpöverkoston kysyntäjousto.....	25
2.4.8	Kiinteistöjen saneeraus & uudisrakentaminen.....	26
3	Kaukolämmön kysyntäjousto.....	28
3.1	Kaukolämmön tarve.....	28
3.2	Asiakaskiinteistöjen vaikutus kaukolämmön kulutukseen.....	30
3.3	Miten joustoja syntyy.....	34
3.4	Kysyntäjouston vaikutukset kaukolämpötoimijoille.....	35
3.5	Kysyntäjouston vaikutukset asiakkaalle.....	38
3.5.1	Miten asiakas saadaan mukaan joustavaan kaukolämpöjärjestelmään.....	38
4	Kysyntäjoustojen luominen verkostoon.....	39
4.1	Hankkeen esittely, tavoitteet ja tutkimusmenetelmät.....	39
4.2	Tutkimusosuus.....	41
4.2.1	Kaukolämpöverkon optimoituminen.....	42
4.2.2	Uusiutuvan energian osuus.....	43

4.2.3	Vaikutukset kiinteistöihin ja asiakkaille	44
4.2.4	Vaikutukset tuottajalle	46
4.3	Vertailu hankkeen tavoitteisiin	48
5	Kysyntäjousten vaikutukset ja johtopäätökset	50
	Lähteet	52

1 Johdanto

Euroopan unionin asettamat päästövähennystavoitteet edellyttävät merkittäviä muutoksia jäsenvaltioiden energiantuotannossa ja kulutuksessa. Suomessa yksi keskeisistä keinoista vähäpäästöisen energiajärjestelmän rakentamisessa on kaukolämmön kehittäminen kohti energiatehokkaampaa ja kestävämpää tuotantoa. Tämä diplomityö tukee näiden tavoitteiden saavuttamista tarkastelemalla kysyntäjoustopotentialiaaleja tehostaa kaukolämpöverkon toimintaa ja vähentää siihen liittyviä päästöjä. Työ on tehty Lappeenrannan Energiaverkot Oy:n tarpeisiin osana BeyondEE -projektia.

Työssä keskitytään erityisesti alasjoustopotentialiaalin vähentämisen vaikutuksiin Lappeenrannan kaukolämpöverkossa toteutetun pilotin avulla. Aihe on ajankohtainen, sillä energiajärjestelmät ovat murroksessa ja tarve joustaville, uusiutuvaa energiaa tukeville ratkaisuille kasvaa jatkuvasti. Kysyntäjousto tarjoaa konkreettisen välineen vastata tähän tarpeeseen älykkään kulutuksenohjauksen avulla.

Viime vuosina aihe on saanut kasvavaa huomiota, ja erityisesti pohjoismaisissa tutkimuksissa on tunnistettu kysyntäjoustopotentialiaali kulutuspiikkien tasaamisessa sekä päästöintensiivisen tuotannon vähentämisessä. Useissa tutkimuksissa on havaittu, että kysyntäjousto voi tuottaa hyötyjä sekä energian tuottajille että kuluttajille – ilman merkittäviä haittoja asiakaskokemukselle. Erityisesti on todettu, että kaukolämmön kysyntäjoustopotentialiaalit eivät aiheuta merkittävää sisälämpötilan laskua tai asumismukavuuden heikkenemistä, kun ohjaus toteutetaan hallitusti ja lyhytaikaisesti.

Tämän työn tavoitteena on arvioida kysyntäjoustopotentialiaaleja Lappeenrannan kaukolämpöverkossa erityisesti tuotannon optimoinnin, kustannustehokkuuden ja päästövähennysten näkökulmista. Tutkimusongelma kiteytyy kysymykseen: Miten kysyntäjousto vaikuttaa kaukolämmön tuotantoon, kustannuksiin ja päästöihin alueellisessa verkossa? Työssä keskitytään alasjoustopotentialiaaleihin, ja tuloksia tarkastellaan sekä asiakas- että tuottajanäkökulmista. Aineistona käytetään kolmen kuukauden ajalta kerättyä tuntitason dataa, joka sisältää menolämpötilat, joustopotentialiaalit, sähkön spot-hinnat ja päästöintensiteetin. Tätä tuntikohtaista dataa yhdistelemällä muodostetaan kokonaiskuva alasjoustopotentialiaaleista paitsi kulutukseen, myös tuotantokustannuksiin ja hiilidioksidipäästöihin.

Tutkimuksessa on rajattu pois kesäkausi, jolloin lämmöntarve on vähäinen. Työ rakentuu siten, että ensin esitellään teoria suomalaisesta kaukolämpöjärjestelmästä, sen tulevaisuudennäkymistä sekä kysyntäjoustoperinteistä. Tämän jälkeen esitellään BeyondEE-hanke ja sen tavoitteet. Varsinaisessa tutkimusosuudessa käsitellään pilotin vaikutuksia kahdeksan suorituskykymittarin avulla. Lopuksi esitetään johtopäätökset ja tarkastellaan, millaisia vaikutuksia kysyntäjoustopilotilla olisi koko Lappeenrannan Energian kaukolämpöverkkoon skaalattuna.

2 Kaukolämpö lämmitysmuotona

Kaukolämmitys on keskitetty tapa tuottaa ja jakaa rakennusten ja käyttöveden lämmittämiseen tarvittava lämpö asiakkaina oleville kiinteistöille. (Koskelainen et al., 2006, s. 25) Kaukolämpö siirtyy asiakkaalle kaksiputkista verkostoa pitkin. Vesikiertoisessa kaukolämmityksessä lämpö siirtyy putkissa kiertävän veden mukana. Luovutettuaan lämmön asiakkaan kiinteistöön, vesi palaa lämmityslaitokselle uudelleen lämmitettäväksi. (Koskelainen et al., 2006, s. 43)

2.1 Kaukolämmön tuotanto ja jakelu

Kaukolämpöjärjestelmään kuuluu lämmön siirtämiseen tarvittava putkisto eli kaukolämpöverkko, lämpöä tuottavat lämmityslaitokset sekä asiakkaan lämmönjakolaitteet. Vettä lämmitetään voimalaitosten lämmönsiirtimissä tai lämmityslaitosten kattiloissa, ja lämmitetty kaukolämpövesi saadaan liikkeelle pumppujen avulla. Yleisimmin lämmönsiirtoon käytetään yhtä meno- ja yhtä paluuputkea, jotka ovat samankokoiset. (Koskelainen et al., 2006, s. 43)

Kaukolämmön kulutukselle on useita eri tehoryhmiä – perusteho, keskiteho, huipputeho ja varateho. Perusteho kattaa kaukolämpöverkoston jatkuvan peruslämmöntarpeen ympäri vuoden, ja perustehon lämpölaitokset ovat toiminnassa jatkuvasti. Keskitehon lämmöntuotanto täydentävät peruslämmöntuotantoa, ja huipputehon voimalaitokset otetaan käyttöön huipputehon tarpeen aikaan, esimerkiksi kylminä pakkaspäivinä. Varatehon voimalaitokset käynnistetään poikkeustilanteissa, esimerkiksi silloin, kun johonkin verkoston osaan ei saada syötettyä lämpöä tavanomaista reittiä pitkin. (Koskelainen et al., 2006, s. 259)

Kaukolämpöä tuotetaan keskitetysti isoissa lämpö- ja voimalaitoksissa ja hajautetusti pienemmissä lämpölaitoksissa. Alla olevassa taulukossa 1 on esitetty Lappeenrannan kantaverkoston lämpölaitokset, niiden tehot sekä polttoaineet. Kaukaan Voiman ja Mertaniemen lämpölaitokset on merkitty nimillä, mutta muut lämpölaitokset on nimetty numerojärjestyksessä suurimmasta tehosta pienimpään.

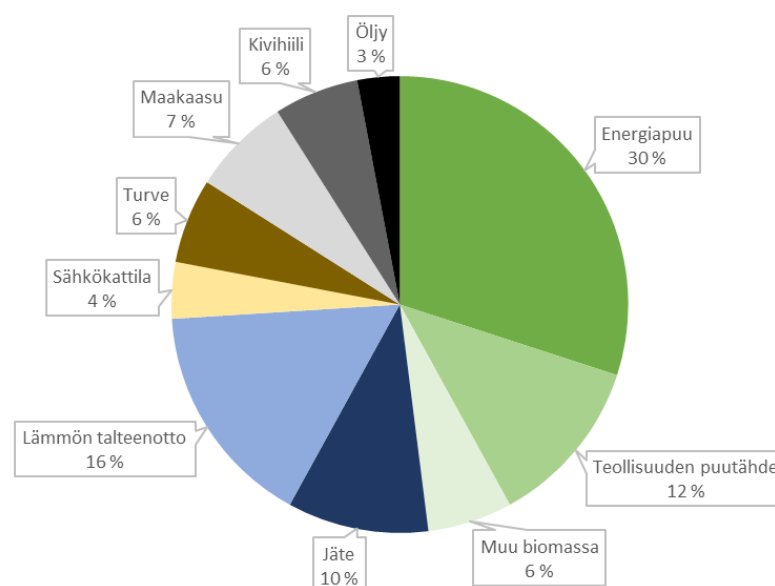
Taulukko 1. Lappeenrannan Energian kantaverkoston lämpölaitokset ja niissä käytetyt polttoaineet

Lämpölaitos	Lämpöteho [MW]	Polttoaine
Kaukaan voima	110	Biopolttoaineet, turve, maakaasu
Mertaniemi	150	Maakaasu, kevyt polttoöljy, sähkö
LK1	54	Kevyt polttoöljy
LK2	46	Maakaasu, kevyt polttoöljy, pelletti
LK3	25	Maakaasu, kevyt polttoöljy
LK4	12	Maakaasu
LK5	7,5	Maakaasu
LK6	6	Maakaasu, kevyt polttoöljy
LK7	3	Maakaasu, kevyt polttoöljy

2.2 Kaukolämmön tuotannossa käytetyt polttoaineet

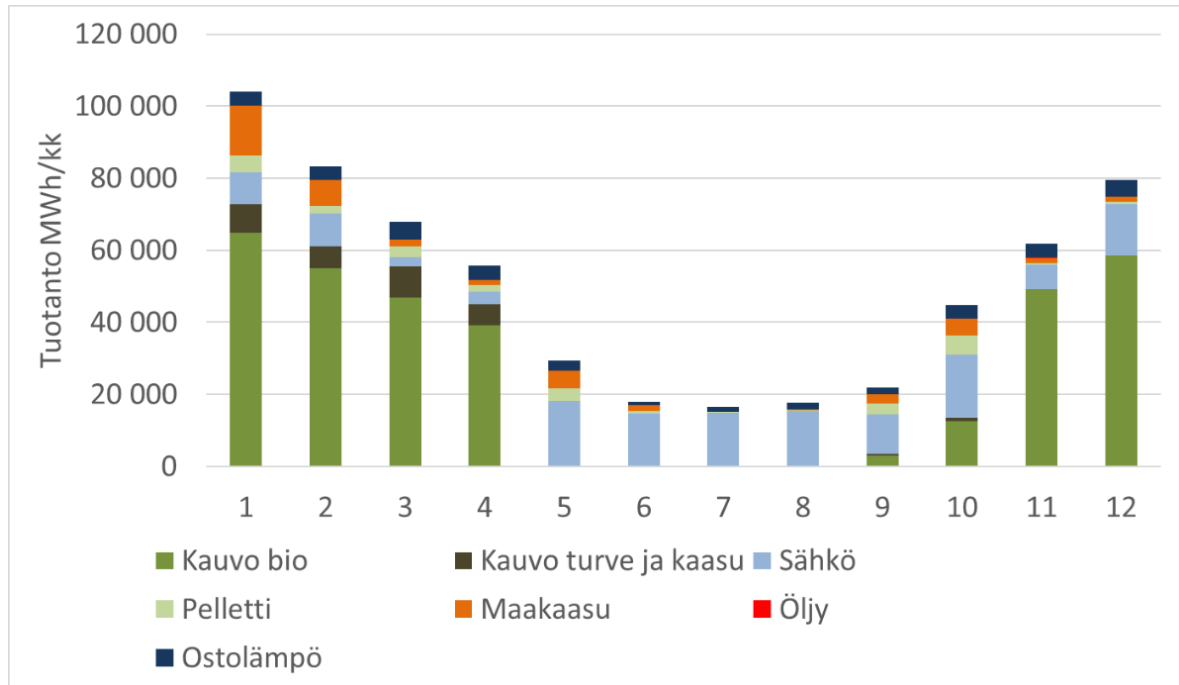
Kaukolämmön tuotanto on muuttunut paljon viime vuosien aikana. Esimerkiksi vielä vuonna 2018 kaukolämmön tuotannosta 16,5 % tuotettiin maakaasulla, 23,5 % hiilellä, 16,6 % turpeella ja puulla, 37,2 % biomassalla, ja yhteensä 90,1 % kaukolämmön tuotannosta on tehty perinteisillä polttoon perustuvilla teknologioilla. <https://energia.fi/wp-content/uploads/2023/08/Kaukolampotilasto2018.pdf>

Kaukolämmön tuotannossa käytetyt polttoaineet vuonna 2024 on esitetty kuvassa 1.



Kuva 1. Kaukolämmön tuotannossa käytetyt polttoaineet vuonna 2024 (Energieateollisuus ry, 2025a)

Alla on esitetty Lappeenrannan Energian vuoden 2024 polttoainejakauma kaukolämmön hankinnassa.



Kuva 2. Lappeenrannan Energian hankkimien kaukolämmön energialähteet vuoden 2024 aikana. (Lappeenrannan Lämpövoima, 2025)

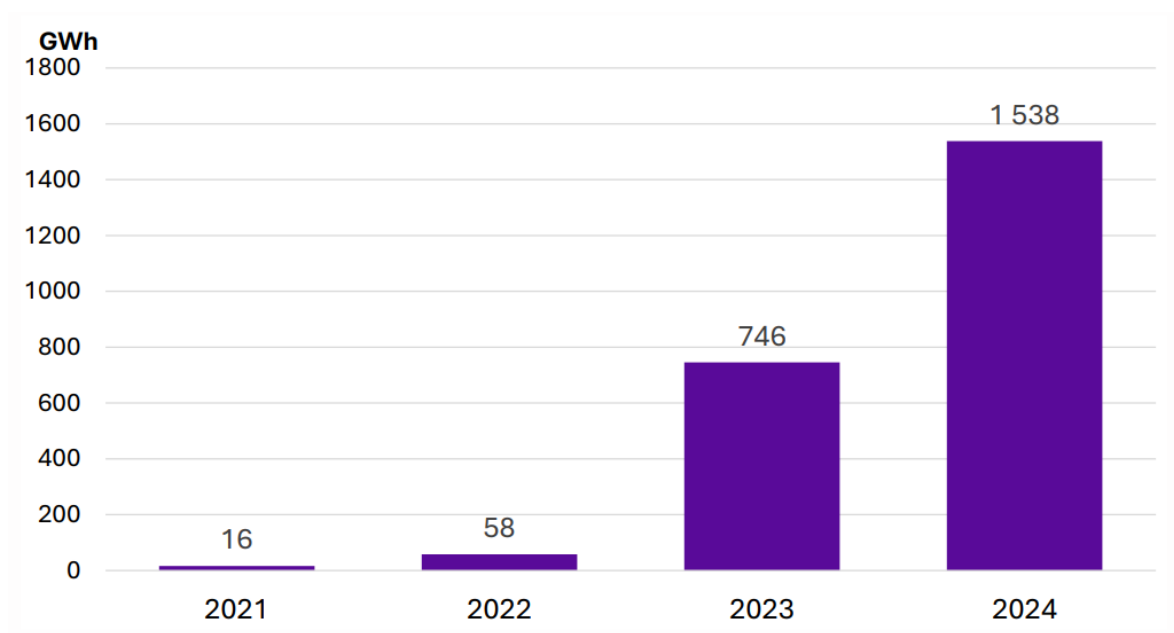
Kuten laajasta polttoainevalikoimasta nähdään, kaukolämmön tuotannossa lämmönlähteet ovat monipuolisia. Monipuolisuus tarkoittaa myös joustavuutta, kun eri lämmönlähteet tukevat toisiaan, ja tuotantoa voi säädellä esimerkiksi hinnan mukaan.

Polttoon perustuvilla teknologioilla kaukolämpöä tuotetaan voimalaitoksilla yhteistuotantona tai erillisissä lämpölaitoksissa. Kuten vuosien 2018 ja 2023 luvuista huomataan, aiemmin polttoon perustuvat teknologiat olivat yleisiä, kun fossiilisia polttoaineita käytettiin paljon. Nykyään polttoon perustuvat teknologiat käsittävät pääasiassa erilaisia biopolttoaineita, joita saadaan käyttöön esimerkiksi metsäteollisuuden sivuvirroista. Bioenergian osuutta lämmöntuotannossa onkin saatu lisäystä, kun fossiilisille polttoaineille mitoitettut kattilat ja tuotantolaitokset on mahdollista muuttaa biopolttoaineille sopiviksi.

Sähkökattilat ovat yleistyneet kaukolämmön tuotannossa vuosina 2023 ja 2024. Lappeenrannassa sähkökattila rakennettiin jo 1980-luvun alkupuolella öljykriisin aikana, ja nyt se on modernisoituna otettu uudelleen käyttöön. Kaukolämpöä tuotetaan sähköllä erityisesti silloin, kun sähkön hinta on alhainen. Sähkö täytyy kuluttaa reaaliajassa, sillä sen

varastoiminen ei ole mahdollista. Tämä tekee sähkökattiloista myös hyödyllisiä sähköverkon tasapainottamisessa, kun halvan sähkön aikana sähköä on runsaasti saatavilla. (Karjalainen, 2025)

Kaukolämmön tuotanto sähkökattilalla on usein taloudellisesti kannattavampaa kuin fossiilisia polttoaineita käyttävien pienten lämpölaitosten käyttö. Tämä johtuu siitä, että fossiilisiin polttoaineisiin liittyy paitsi polttoaineen hinta, myös päästöoikeuksista aiheutuvia lisäkustannuksia. Lisäksi sähkö voidaan tuottaa uusiutuvilla energialähteillä, mikä tekee myös kaukolämmöstä ekologisemman vaihtoehdon. (Karjalainen, 2025)



Kuva 3. Sähkökattiloilla tuotettu kaukolämpö (Energiateollisuus ry, 2025a)

Kesäaikaan, kun päätuotantolaitokset, kuten Lappeenrannan verkostossa Kaukaan Voiman CHP-laitos, ovat huollossa, kaukolämpö on tuotettava muilla keinoin. Kuten aiemmin on esitelty, verkostossa on useita pieniä lämpölaitoksia, joita käytetään kesäisin peruslämmön tuottamiseen.

Osa kattiloista on muunnettu käyttämään pellettiä fossiilisten polttoaineiden sijaan. Laajamittaiseen käyttöönottoon pellettikattilat eivät kuitenkaan ole ihanteellinen ratkaisu, sillä konversion yhteydessä kattiloiden teho heikkenee, muunnokset ovat kalliita, ja niiden jälkeen kattiloiden käyttövarmuus heikkenee samalla kun huoltotarve kasvaa. Lisäksi pelletin logistiikka on haastavampaa kuin muiden polttoaineiden, mikä lisää toimitusketjun monimutkaisuutta. (Koivula, 2025)

Pelletti tarjoaa kuitenkin etuja: sen avulla voidaan varmistaa riittävä teho, mikä laajentaa polttoainevalikoimaa ja vähentää polttoaineriskejä. Kesäaikaan pellettikattilat toimivat myös eräänlaisena vakuutuksena sähkökattilalle, eli ne mahdollistavat kaukolämmön tuotannon myös silloin, kun sähkön hinta on korkea, varmistaen näin taloudellisesti kannattavan lämmönlähteen saatavuuden. (Koivula, 2025) Lisäksi pelletin etu on se, että se on uusiutuva energianlähde.

Elektronisten laitteiden, kuten puhelinten ja tietokoneiden, käyttö kuormittaa palvelinkeskuksia, joiden laitteet tuottavat lämpöä. Palvelinkeskusten jäähditys toteutetaan poistamalla niiden ylijäämälämpö, joka voidaan hyödyntää tehokkaasti esimerkiksi kaukolämmityksen tarpeisiin. Myös Lappeenrannassa on suunnitteilla investointeja Mertaniemeen sijoitettavaan lämpöpumppulaitokseen, joka hyödyntäisi datakeskusten tuottamaa hukkalämpöä kaukolämmön tuotannossa. Laitoksen on suunniteltu koostuvan useista lämpöpumppuyksiköistä, joiden yhteinen lämpöteho olisi 24 MW. Lämpöpumppulaitos tuottaisi vuosittain noin 120 GWh energiaa kaukolämpöverkkoon, mikä vastaa noin neljännestä kaupungin kaukolämmön tarpeesta. (Lappeenrannan Energia, 2024c)

Lämpöpumpputeknologialla nostetaan matalalämpötilaisen lämmönlähteen lämpötilaa korkeammalle tasolle. Lappeenrannan alueen kaukolämmön tuotannossa näitä ei ole otettu vielä käyttöön, mutta muualla Suomessa lämpöpumppulaitoksia on käytössä. Esimerkiksi Helsingissä kaukolämpöä tuotetaan lämpöpumpputeknologialla puhdistetusta jätevedestä sekä kaukojäähdytyksen paluuedestä. (Helen Oy, 2025)

Kaukolämmön tuotantoon käytetään edelleen myös maakaasua ja öljyä, sillä ne tarjoavat edelleen varmaa ja helposti säädettävää energiaa, jota voidaan ottaa nopeasti käyttöön huipukulutuksen aikaan tai silloin, kun muut tuotantomuodot eivät riitä. Maakaasulla ja öljyllä on hyvä lämpöarvo, ja niitä on helppo varastoida. Vaikka kaukolämmön tuotannossa pyritäänkin siirtymään uusiutuviin polttoaineisiin, myös öljyllä ja maakaasulla on ainakin vielä toistaiseksi pieni osuus tuotannon polttoainevalikoimassa.

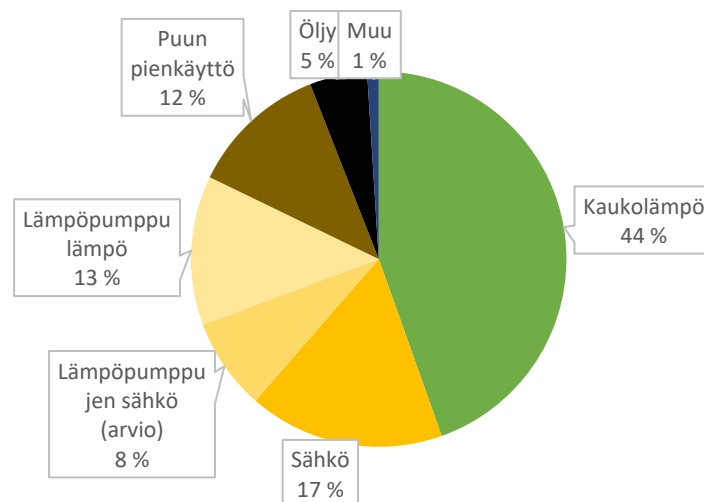
Viimeisten vuosien aikana polttoainevalikoimassa tapahtunut muutos on johtunut monista taloudellisista ja ympäristöllisistä syistä. Yksi keskeisimmistä tekijöistä on päästövähenny tavoitteet, jotka ovat ohjanneet fossiilisten polttoaineiden käytön asteittaiseen vähentämiseen. Näiden tilalle on otettu laajemmin käyttöön biomassaa, joka tarjoaa vähäpäästöisemmän vaihtoehdon energiantuotantoon.

Lisäksi fossiilisten polttoaineiden kustannusten nousu on tehnyt niistä yhä vähemmän houkuttelevia. Poliittiset tilanteet ovat vaikuttaneet merkittävästi polttoaineiden hintoihin, ja esimerkiksi maakaasu on tällä hetkellä kallista. Sen takia fossiiliset polttoaineet ovat epävakaita ja kustannustehottomia vaihtoehtoja. Lisäksi hintojen nousuun ovat vaikuttaneet verotuksen ohjaavat mekanismit, jotka ovat entisestään vähentäneet fossiilisten polttoaineiden kilpailukykyä.

Myös uusien teknologioiden kehitys on muokannut energiantuotannon rakenteita. Datakeskukset ja teollisuuden prosessit tuottavat yhä enemmän hukkalämpöä, jota voidaan hyödyntää tehokkaasti jopa suurissa voimalaitoksissa. Tämä on vähentänyt perinteisen energiantuotannon tarvetta ja vauhdittanut siirtymistä kohti uudenlaisia kaukolämpöratkaisuja.

2.3 Kaukolämpö Suomessa

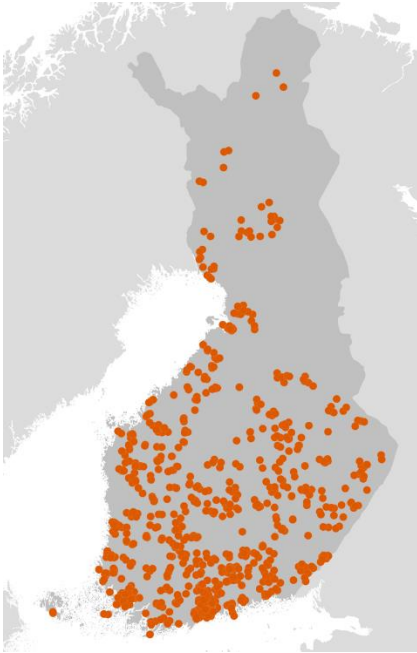
Kaukolämpö on yleisin lämmitysmuoto Suomen taajamissa ja kaupungeissa. Vuonna 2023 kaukolämpöä tuotettiin 37,3 TWh. (Energiatasollisuus ry, 2024) Kaukolämmitys on sitä taloudellisempaa, mitä tiheämmin rakennettu alue on ja mitä isompia rakennukset ovat. (Energiamaailma, 2024) Vuoden 2021 tilastojen mukaan kaukolämmön markkinaosuus asuin- ja palvelurakennuksissa on 45 % (kuva 4).



Kuva 4. Lämmitysmuotojen markkinaosuudet vuonna 2022 (Energiateollisuus ry, 2025a)

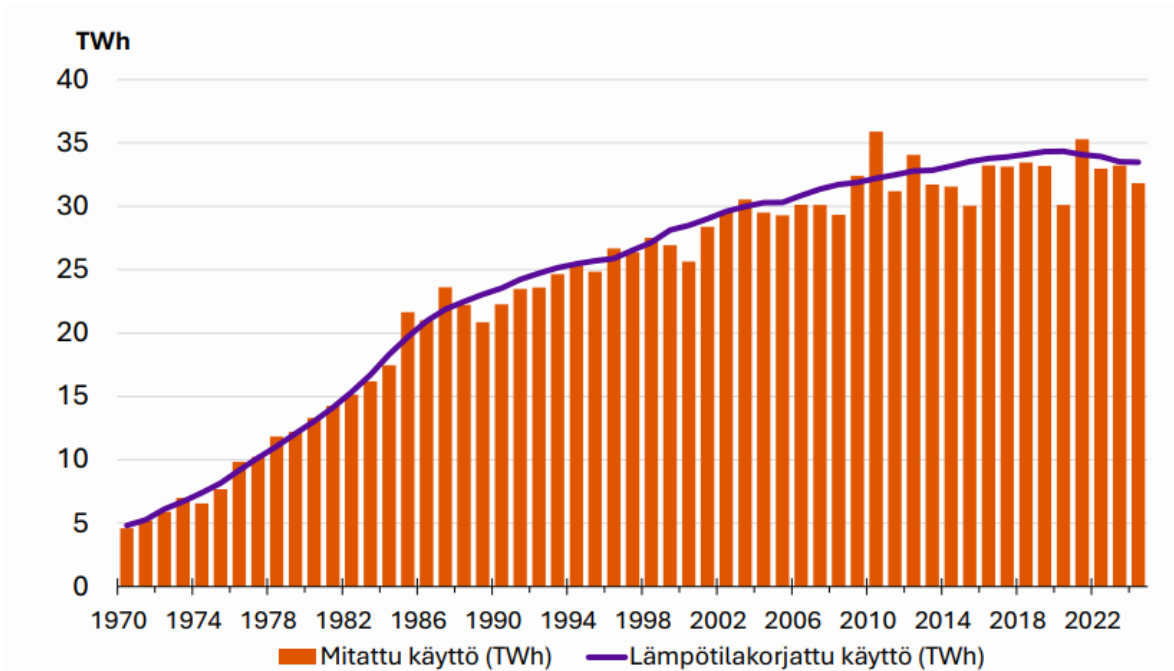
Vuonna 2022 kaukolämmitettyjen asuntojen asukasluku oli 2,9 miljoonaa henkilöä. (Energiateollisuus ry, 2023) ja kaukolämpöverkoston pituus Suomessa on noin 16 000 kilometriä.

(Energieateollisuus ry, 2024b.) Kaukolämpöä on saatavilla lähes kaikissa Suomen taajamissa, mikä tekee siitä keskeisen energiamuodon monille alueille. Vuonna 2022 kaukolämpöä oli saatavilla 176 kunnassa (kuva 5).



Kuva 5. Kaukolämmön tuotantolaitokset Suomen kartalla vuonna 2022 (Energieateollisuus ry, 2023)

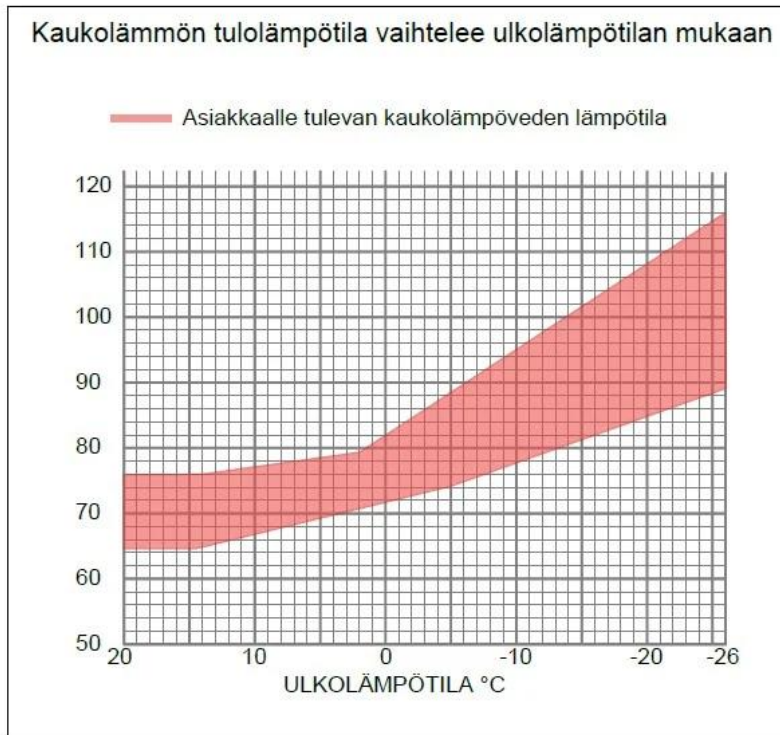
Pientaloalueilla kaukolämpöä ei usein ole saatavilla, mutta uusilla kerrostaloalueilla kaukolämmön suosio on jopa hieman kasvanut. (Energieateollisuus ry, 2024c) Vaikka kaukolämmön suosio on kasvanut, kaukolämmön lämpötilakorjattu käyttö kuitenkin laski vuoteen 2022 verrattuna kuvan 6 mukaisesti. Tämä kertoo rakennusten energiatehokkuuden parane- misesta, kun lämmitykseen ja käyttöveden lämmittämiseen kuluu vuositasolla vähemmän energiaa.



Kuva 6. Mitattu sekä lämpötilakorjattu kaukolämmön käyttö (Energiateollisuus ry, 2025a)

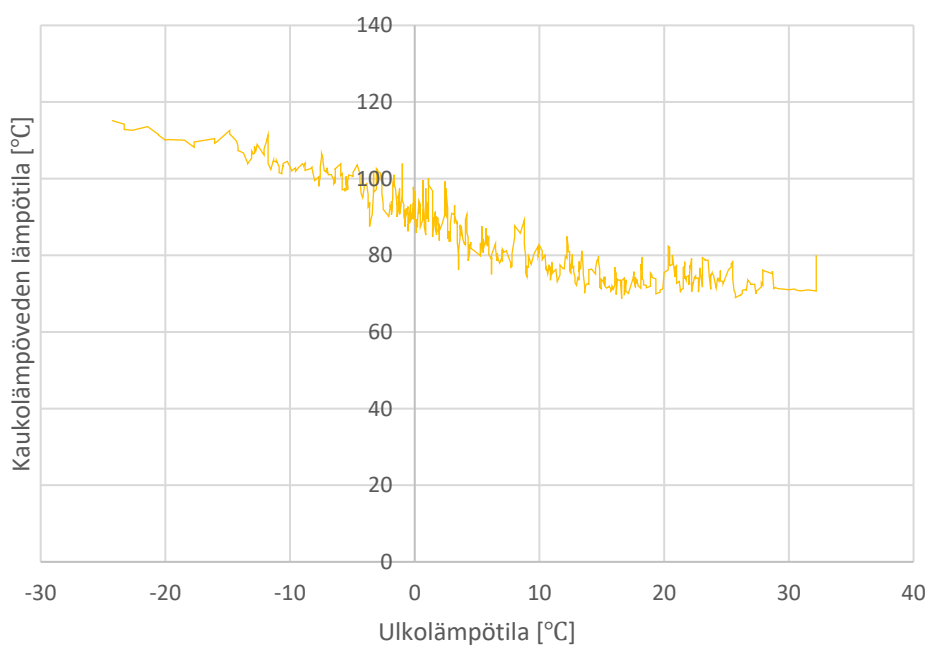
Asiakkaalle kaukolämmitys on huoleton lämmitysmuoto. Kaukolämmityksen etuihin kuuluu mm. se, että energiayhtiö huolehtii järjestelmän ylläpidosta ja varmistaa, että lämmöntoimitus kiinteistöön on keskeytyksetöntä. Kaukolämmön toimitusvarmuus on korkealla tasolla. Vuonna 2023 kaukolämmön toimitusvarmuus oli 99,98 % ja keskimääräinen vuosittainen keskeytysaika on alle kaksi tuntia asiakasta kohden. Suunnitellut keskeytykset ajoitetaan mahdollisuuksien mukaan lämmityskauden (1.10.–30.4.) ulkopuolelle ja niistä tiedotetaan asiakkaalle etukäteen. Suunnitellut keskeytykset johtuvat verkostotöistä, esimerkiksi uusien asiakkaiden kytkemisestä kaukolämpöverkkoon, kun taas suunnittelemattomat keskeytykset ovat tyypillisesti kaukolämpöverkoston vaurionkorjausta. (Energiateollisuus ry, 2023b)

Suomessa kaukolämmön tuloveden lämpötila on ulkolämpötilan mukaan 65 °C - 115 °C välillä. Mitä kylmempi ulkolämpötila, sitä kuumempaa on kaukolämpövesi. Vastaavasti kesäaikaan, kun tilojen lämmitystarve on vähäinen ja kaukolämpöä tarvitaan vain lämpimän käyttöveden lämmittämiseen, on myös kaukolämpöverkoston lämpötilat matalammat, kuten kuvasta 7 havaitaan.



Kuva 7. Kaukolämmön tulolämpötila ulkolämpötilan mukaan (Helen Oy, 2024)

Lappeenrannan kaukolämpöverkostossa lämpötilat ovat kuvan 8 mukaisesti vaihdelleet 70 °C –115 °C välillä. Kuva on muodostettu kaukolämpöverkon lämpötiloista syyskuun 2023 ja syyskuun 2024 väliseltä ajalta.



Kuva 8. Lappeenrannan kaukolämpöverkoston lämpötilat ulkolämpötilaan verrattuna

2.3.1 Kaukolämpö Lappeenrannassa

Lappeenrannan Energialla on noin 5500 kaukolämpöasiakasta, ja kaukolämpöverkon pituus on n. 400 kilometriä kattaen Lappeenrannan keskustan ja sen lähialueet. Lisäksi Selkäharjun, Joutsenon ja Rauhan alueilla on erilliset kaukolämpöverkostot. (Lappeenrannan Energia, 2024) Kaukolämpöverkosto on tiheästi asutuilla alueilla rengasmaisen, mikä tarkoittaa, että kaukolämpöä voidaan toimittaa samaan kohteeseen useaa eri kautta. Tämä parantaa toimitusvarmuutta, sillä mahdolliset jakelukeskeytykset voidaan rajata mahdollisimman pienelle alueelle. Lappeenrannan Energiaverkkojen kaukolämpöverkosto koostuu monen ikäisistä ja kokoisista putkista, joissa suurimpien runkojohtojen halkaisija on DN600 ja pienimpien talojohtojen DN20. Verkoston vanhimmat putkiosuudet ovat peräisin 1960-luvun alkupuolelta, ja verkostoa uudistetaan ja saneerataan säännöllisesti vuosittain. (Lappeenrannan energia, 2024b)

2.4 Tulevaisuuden kaukolämpöjärjestelmä

Kaukolämmön, ja kaiken muun energiantuotannon, kehityssuunta on siirtyä kohti uusiutuvia energiamuotoja ja näin ollen vähentää kaukolämmön päästöjä. Myös kuluttaja voi halutessaan varmistaa ostamansa energian alkuperän. Energian alkuperätakuu siis varmistaa sen, että tietty energiamäärä, eli kiinteistön käyttämä kaukolämpö, on tuotettu uusiutuvilla energianlähteillä. Alkuperätaattua kaukolämpöä voivat hankkia kaikki kaukolämpöasiakkaat, ja useilla energiayhtiöillä alkuperätaattu kaukolämpö kuuluu tuotevalikoimaan. Esimerkiksi Helenin, Alvan, Lahti Energian ja Savon voiman toimittamaan kaukolämpöön on saatavilla lisätuotteena alkuperätakuilla varmennettua lämpöä, jonka päästökerroin on 0 gCO₂/kWh. Lappeenrannan Energian kaukolämpöasiakkaat voivat halutessaan ostaa alkuperätakuilla varmennettua biolämpöä, joka tuotetaan Kaukaan Voiman biovoimalaitoksella pääasiassa metsäteollisuuden sivuvirroista. (Lappeenrannan Energia, 2025)

Aikaisemmin kaukolämpöverkoston on kehitetty mm. putkimateriaalien ja lämmöneristyksen kautta, mutta nyt ollaan siirtymässä yhä uusiin keinoihin parantaa kaukolämpöverkoston niin ilmastoa, kustannuksia kuin käyttäjävälisyyttäkin ajatellen. Taulukossa 2 on esitetty kaukolämmön nykyisiä sekä tulevia piirteitä.

Taulukko 2. Kaukolämmön piirteitä tällä hetkellä ja tulevaisuudessa (Mukaiillen Paiho & Reda, 2016, s. 28)

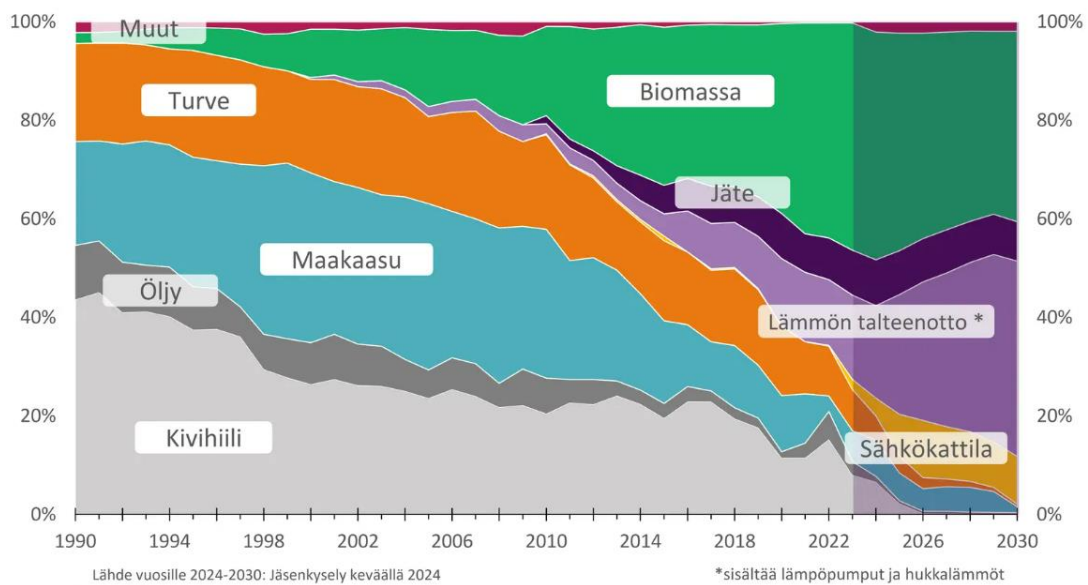
Kaukolämpö tällä hetkellä	Kaukolämpö tulevaisuudessa
Käytössä uusiutumattomia energianlähteitä	Uusiutuvat, polttoon perustumattomat, energianlähteet
Keskitetty energiantuotanto	Hajautettu, paikallinen lämmöntuotanto
Kunnalliset tuotantomonopolit	Sektori-integraatio (sähkö, lämpö, jäähdytys)
Nykyiset osakkeenomistajat	Lämpöverkkojen avautuminen ja tuottajakulutajat
Menoveden mitoituslämpötila 115 °C	Matalalämpöinen kaukolämpö, 90 °C
Energiatohokkuudeltaan erilaiset rakennukset kytkettyinä kaukolämpöön	Kaukolämpöverkossa yhä enemmän matala-energiataloja
Perinteiset teknologiat, vähäinen älykkyyden ja digitalisaation hyödyntäminen	Lämmöntuotantoa tukevien teknologioiden hyödyntäminen (esim. lämpöpumput) ja älykkäät järjestelmät
Perinteiset liiketoimintamallit	Uudet liiketoimintamallit
Tuotanto lämmöntarpeen mukaan	Joustava tuotanto ajoitettu edullisimpaan ajankohtaan

2.4.1 Uusiutuvan energian edistäminen

Noin 80 prosenttia ilmaston lämpenemistä aiheuttavista kasvihuonekaasuista syntyy energian tuotannosta ja kulutuksesta, mukaan lukien liikenne. Hiilineutraalin lämmityksen rooli on keskeinen kasvihuonekaasupäästöjen vähentämisessä. Kaukolämmöllä ja -jäähdytyksellä on tulevaisuuden energiajärjestelmissä merkittävä asema. Geo- ja maalämpö sekä muu uusiutuva energia, yhdistettynä lämpöpumpputeknologiaan pohjautuviin ratkaisuihin, täydentävät päästöttömiä lämmönlähteitä ja soveltuvat erinomaisesti kaukolämpöverkostoihin. Maalämmön käyttö etenee jo nyt nopeasti markkinaehtoisesti. (Työ- ja elinkeinoministeriö, 2022, s. 9)

Kestävällä tavalla tuotetun lämmitysbiomassan saatavuus on kuitenkin rajallista, mikä korostaa tarvetta siirtyä polttoon perustumattomiin lämmitysratkaisuihin. Turpeen energiakäytön nopea vähentyminen on heikentänyt sen merkitystä pitkäaikaisena huoltovarmuuspoltoaineena, ja sen tilalle on tullut suurelta osin puupolttoaineita. Puupolttoaineiden, kuten metsäteollisuuden sivuvirtojen ja metsähakkeen, osuus kaukolämmön energialähteenä kasvoi vuoteen 2021 mennessä 37 prosenttiin, mikä korostaa niiden tärkeyttä lämmöntuotannossa. (Työ- ja elinkeinoministeriö, 2022, s. 46)

Kivihiilen ja energiaturpeen käytöstä luopuminen vähentää perustuotannon polttoainevaihtoehtoja, mikä kasvattaa energiapuun tarvetta lähivuosina merkittävästi. Useiden skenaarioiden mukaan puupolttoaineet pysyvät merkittävässä roolissa energiantuotannossa ainakin seuraavat 20–30 vuotta tai jopa pidempään, sillä monet polttoon perustumattomat teknologiat ovat vasta kaupallistumisen alkuvaiheessa. Näiden teknologioiden kehittämisellä on tärkeä merkitys myös huoltovarmuuden näkökulmasta, sillä ne auttavat korvaamaan fossiilisten tuontipolttoaineiden käyttöä lämmöntuotannossa. (Työ- ja elinkeinoministeriö, 2022, s. 46)



Kuva 9. Kaukolämmön hankinnan energialähteet, ennustus vuodelle 2030 asti. (Energiatollisuus ry, 2024)

2.4.2 Hukkalämpöjen potentiaali kaukolämpöjärjestelmissä

Suomessa syntyy arviolta noin 130 TWh hukkalämpöä, josta tällä hetkellä hyödynnetään kaukolämmön tuotantoon noin 3 TWh. Teknologisesti ja taloudellisesti kohtuudella hyödynnettävissä olevan hukkalämmön potentiaaliksi arvioidaan noin 35 TWh. Tämän potentiaalın hyödyntäminen voisi mahdollistaa kivihiilen käytön täydellisen lopettamisen energiantuotannossa. Hukkalämmön laajempaan hyödyntämiseen liittyy kuitenkin haasteita, kuten taloudelliset kannattavuuskysymykset ja liiketoiminnalliset riskit. Suuri osa hyödyntämättömästä potentiaalista löytyy teollisuudesta ja lauhdelaitoksista, joissa teollisuuden osuus on noin 15 TWh. Tämä vaatii kuitenkin huomattavia investointeja. Teollisuuden hukkalämmön hyödyntäminen kaukolämmössä on kuitenkin kolminkertaistunut viimeisen kymmenen

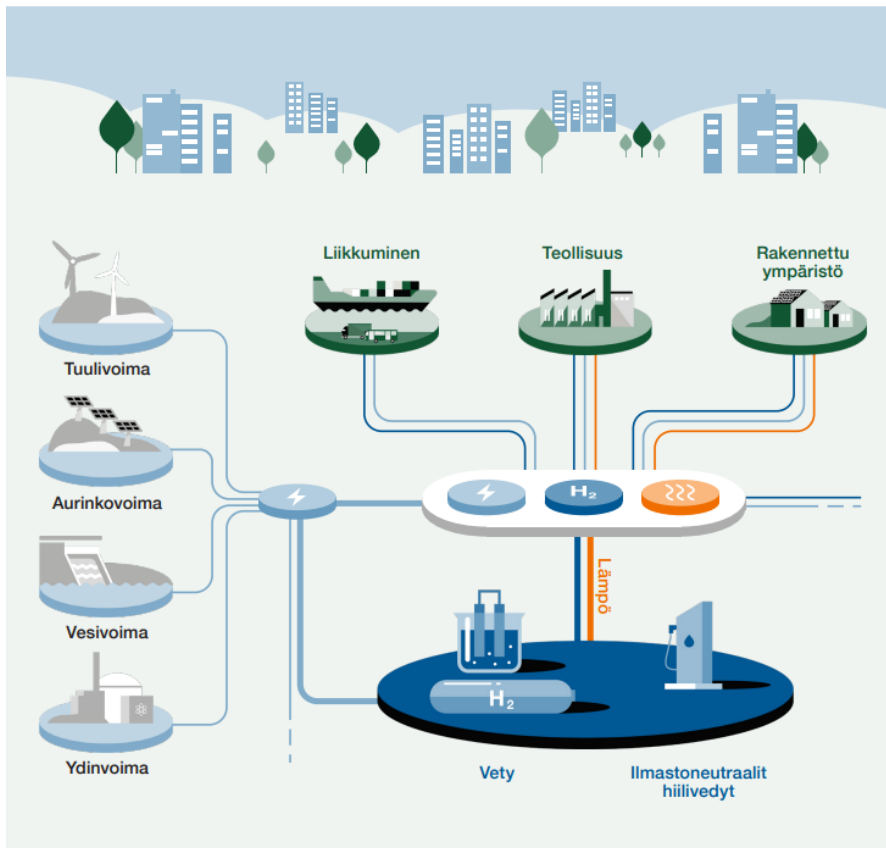
vuoden aikana, mikä korostaa sen merkitystä kestävässä energiaratkaisuissa. (Työ- ja elinkeinoministeriö, 2022, s. 58–59)

Hukkalämmön hyödyntämisen keskeiset kustannukset liittyvät siirtoverkkojen rakentamiseen ja lämpöpumppuihin, joiden rooli on keskeinen hiilineutraalissa energiajärjestelmässä. Lämpöpumpputeknologian merkitys kasvaa tulevaisuudessa, kun aiemmin kannattamattomat lämmönlähteet muuttuvat taloudellisesti järkeviksi teknologian ja toimintaympäristön kehityksen myötä. Nämä muutokset edistävät myös lämpö- ja sähkömarkkinoiden integroitumista, mikä luo uusia mahdollisuuksia innovatiivisille energiaratkaisuille. (Työ- ja elinkeinoministeriö, 2022, s. 58–59)

Tulevaisuudessa lämpöä tuotetaan siellä, missä se on tehokkaimmin saatavilla, eikä sen tuotanto perustu enää vanhoihin menetelmiin. Fossiiliset polttoaineet korvataan älykkäillä ja joustavilla sähköön perustuvilla ratkaisuilla, jotka hyödyntävät hukkalämpöjä, geotermistä energiaa, meriveden lämpöä sekä bioenergiaa. Lisäksi perinteiset lämmönkuluttajat voivat tulevaisuudessa toimia myös lämmöntuottajina, jolloin hajautetut ratkaisut lisäävät joustavuutta kaukolämpöjärjestelmään. (Työ- ja elinkeinoministeriö, 2022, s. 193)

2.4.3 Sektori-integraatio

Sektori-integraatio on keskeinen osa tulevaisuuden kestäviä energiajärjestelmiä. Sen avulla parannetaan energian tuotannon ja kulutuksen välistä yhteistyötä, lisätään järjestelmän joustavuutta ja varastointimahdollisuuksia sekä tiivistetään eri energiamarkkinoiden välistä vuorovaikutusta. Tavoitteena on luoda hiilineutraali, energia- ja kustannustehokas sekä joustava energiajärjestelmä. Moderni energiajärjestelmä hyödyntää monipuolisesti erilaisia energiankantajia, kuten sähköä, lämpöä, kaasua ja vetyä. Sektori-integraation avulla näiden kantajien välillä tapahtuu siirtymiä eri tasoilla, mikä mahdollistaa joustavuuden ja varastoinnin yli sektorirajojen, kuten kuvasta 10 huomataan. (VTT, 2022)



Kuva 10. Sektori-integraation toimintakenttä (VTT, 2022)

Sektori-integraation toteuttaminen edellyttää monien osapuolten sitoutumista yhteisiin projekteihin sekä yhteisen näkemyksen muodostamista siitä, miten integroidut järjestelmät voivat hyödyttää sekä yksittäisiä toimijoita että yhteiskuntaa laajemmin. Yhtenäistä ratkaisumallia ei ole, vaan sektori-integraatio rakentuu toimijoiden välisen yhteistyön kautta. Tämän vuoksi on tärkeää huolehtia rajapintojen sujuvuudesta ja yhteistyömahdollisuuksien hyödyntämisestä. Sektori-integraation onnistuminen vaatii sekä yhteiskunnan tukea että yritysten aktiivista roolia uusien toimintatapojen kehittämisessä. (VTT, 2022)

Aurinko- ja tuulivoiman kaltaiset uusiutuvan sähkön lähteet ovat säästä riippuvaisia, mikä lisää energiantuotannon vaihtelua. Samaan aikaan sähkönkulutuksen vuorokausivaihtelut kasvavat esimerkiksi sähköisen liikenteen yleistyessä. Energiamurroksen keskeinen haaste on sovittaa yhteen vaihteleva tuotanto ja kulutus. Koska sähköä ei voida varastoida suuressa mittakaavassa, tasapainon ylläpitäminen vaatii jatkuvaa säätelyä. Sektori-integraatio tarjoaa tähän ratkaisun yhdistämällä joustavasti eri energiankantajia ja hyödyntämällä kustannustehokkaita menetelmiä. (VTT, 2022)

Myös kaukolämpöjärjestelmät ovat osa ilmastotoimia, ja niiden on muututtava vähäpäästöisemmiksi. Tämä tarkoittaa polttoprosessien korvaamista esimerkiksi hajautetuilla lämpöpumpuilla ja sähkökattiloilla, mikä parantaa merkittävästi sähkö- ja lämpöjärjestelmien välistä integraatiota. Jo nykyisin sähkön ja lämmön yhteistuotanto sekä lämpöpumppeihin perustuva lämmöntuotanto hyödyntävät sähköä osana kaukolämpöä. Kaukolämpöjärjestelmiin liitetyt lämpövarastot tuovat joustavuutta, sillä lämpöä voidaan tuottaa silloin, kun sähköä on runsaasti ja sen hinta on alhainen. Näiden ratkaisujen yleistyessä esimerkiksi lämpöpumppujen käyttö lisääntyy kaikissa kokoluokissa. (VTT, 2022)

Energian varastointiratkaisuista lämmön varastointi suuressa mittakaavassa on taloudellisin vaihtoehto, mutta se edellyttää suuren lämpökuorman, kuten kaukolämpöverkoston, olemassaoloa. (VTT, 2022)

2.4.4 Kaksisuuntainen kaukolämpöverkko

Kaksisuuntainen kaukolämpö on lämmitysmarkkinoille kehitetty toimintamalli, jossa lämpöä käyttävät asiakkaat tai kolmannet osapuolet voivat myös myydä sitä. Asiakas voi myydä kaukolämpöverkkoon ylimääräisen lämmön, jota hän ei itse tarvitse, tai vaihtoehtoisesti myyntiin tarkoituksella tuotettua lämpöä. (Energiateollisuus ry, 2025b)

Potentiaalisista lämmöntuottajista suurimman hyödyn saavat luonnollisesti kohteet, joissa hukkalämpöä tai ylijäämäkapasiteettia on mahdollista siirtää verkkoon helposti ja pienillä kustannuksilla. Tällaisia kohteita löytyy tyypillisesti teollisuudesta, ja erityisen lupaavia esimerkkejä ovat datakeskukset sekä muut suuret jäähdytysratkaisut. Hukkalämpöä on saatavilla kaukolämpöverkoston joka puolella, kun otetaan huomioon myös muut mahdolliset tuottajat, esimerkiksi ruokakaupat. (Pöyry, 2017)

Kaksisuuntaisen kaukolämmön malli tarjoaa hyötyjä niin taloudellisesta, ympäristöllisestä kuin teknisestä näkökulmasta. Se mahdollistaa olemassa olevan hukkalämmön tehokkaan hyödyntämisen, mikä vähentää tarvetta fossiilisten polttoaineiden käyttöön. Tämä parantaa koko energiajärjestelmän energiatehokkuutta ja ympäristöystävällisyyttä, samalla kun se auttaa pienentämään hiilidioksidipäästöjä. (Pöyry, 2017)

Kaksisuuntainen kaukolämpöjärjestelmä lisää myös kaukolämpöverkon joustavuutta. Asiakkaiden tuottama lämpö voi täydentää perinteistä tuotantoa erityisesti huippukulutuksen

aikana, mikä voi pienentää tarpeita uusille tuotantokapasiteetti-investoinneille. Tämä tekee järjestelmästä taloudellisesti houkuttelevan sekä asiakkaille että kaukolämpöyhtiöille. Lisäksi kaksisuuntainen kaukolämpö voi parantaa asiakassuhteita, kun asiakkailla on mahdollisuus aktiivisesti osallistua energiantuotantoon ja hyötyä taloudellisesti omasta tuotannostaan. (Pöyry, 2017)

Kaksisuuntaisen kaukolämmön käyttöönottoon liittyy kuitenkin myös merkittäviä haasteita. Järjestelmän tekninen toteutus on monimutkaista, koska verkkoon syötettävän lämmön lämpötilan on vastattava verkon tarpeita. Tämä voi edellyttää merkittäviä investointeja lämmön siirron ja -varastoinnin infrastruktuuriin. Lisäksi uusien tuottajien liittäminen verkkoon vaatii sopimusten, hinnoittelumallien ja jatkuvan mittauksen kehittämistä, mikä lisää kaukolämpöyhtiöiden hallinnollisia kustannuksia. Keskeinen haaste on myös tuotannon ja kysynnän ajoituksen yhteensovittaminen, sillä esimerkiksi hukkalämmön saatavuus ei ole välttämättä samanaikaista verkon tarpeiden kanssa, varsinkaan kesäkuukausina. Toinen merkittävä haaste liittyy potentiaalisten tuottajien, kuten yksityisten kiinteistöjen, resurssien ja osaamisen puutteeseen. Toimijoilla ei ole välttämättä riittäviä teknisiä valmiuksia tai taloudellisia resursseja liittyä järjestelmään. Osallistumisen kynnystä voidaan kuitenkin madaltaa tarjoamalla yksinkertaisia sopimusmalleja ja palveluja, kuten lämpöpumppujen yhdistämistä kaukolämpöjärjestelmän automaatioon. Lisäksi mahdollisuus käyttää verkkoon syötettyä lämpöä kiinteistöjen energiatehokkuuslaskennassa voisi lisätä kiinteistöjen kiinnostusta järjestelmään. (Pöyry, 2017)

Tulevaisuudessa kaksisuuntaisella kaukolämmöllä on kuitenkin potentiaalia. Kaksisuuntaisen kaukolämmön käyttöönotto voi edistää lämpömarkkinoiden kehittymistä kohti joustavampia ja asiakaslähtöisempiä malleja. Kansainväliset esimerkit, kuten Tukholman ja Kööpenhaminan kaukolämpöjärjestelmät, osoittavat, että tällaiset järjestelmät voivat toimia menestyksekkäästi, kun ne perustuvat vapaaehtoisuuteen ja liiketoiminta suunnitellaan huolellisesti. (Pöyry, 2017)

2.4.5 Matalalämpöinen kaukolämpö

Matalalämpöinen kaukolämpö tarkoittaa sitä, että kiinteistöjen kaukolämpölaitteet mitoiteetaan niin, että ne pystyvät täyttämään kiinteistön lämmön tarpeen 90 °C kaukolämpövedellä aiemman 115 °C sijaan. (HögforsGST, 2023) Kaukolämpöverkkojen mitoituslämpötilan

lasku alle sataan asteeseen mahdollistaa huomattavasti energiatehokkaamman kaukolämpöjärjestelmän ja nopeamman siirtymän kohti päästöttömyyttä. Matalampi lämpötilataso mahdollistaa paremmin erilaisten polttoon perustumattomien ja hajautettujen tuotantomuotojen hyödyntämisen kaukolämmön tuotannossa. Lisäksi matalalämpöisessä kaukolämpöverkossa lämpöhäviöitä syntyy vähemmän. (Energiateollisuus ry, 2024e)

Muutoksen mahdollistamiseksi ensimmäinen käytännön toimenpide on kaukolämpöasiakkaan lämmönjakokeskusten mitoituslämpötilan laskeminen. Muutos on asiakkaalle sujuva ja tapahtuu ajan myötä, kun lämmönjakokeskus uusitaan laitteiden vikaantumisen tai ikääntymisen vuoksi. Kaikki lämmönjakokeskukset toimitetaan jatkossa uusilla mitoitusarvoilla, jotta muutos on mahdollinen ja asiakkaalle varmistetaan hyvä lämmön laatu. (Energiateollisuus ry, 2024e)

Vuosina 2022–2023 asumisen rahoitus- ja kehittämiskeskus Ara myönsi avustusta asuinrakennusten matalalämpötilaisten kaukolämpölaitteistojen vaihtamiseen. Lappeenrannan Energian kaukolämpöasiakkaista avustusta haki noin 200 kiinteistöä, mikä vastaa noin 4 % kaikista kaupungin kaukolämpöverkoston kuuluvista kohteista. Kaukolämpölaitteiston käyttöikä on noin 25–30 vuotta (Lappeenrannan Energia, 2023), joten se, että noin 4 % laitteistoista uusittiin avustuskauden aikana, on normaali tahti. Kaukolämpöverkon lämpötilojen laskeminen tapahtuu siis osittain sitä mukaa, kun asiakaslaitteet on mitoitettu matalammalle lämpötilatasolle. Siirtymää kohti matalalämpöistä kaukolämpöä on mahdollista tehdä myös silloin, kun verkkoon liitetään uusia rakennuksia tai kun suuria rakennuksia tai asuinalueita peruskorjataan.

Kun kaukolämpöverkoston menolämpötilaa lasketaan, verkoston lämpöhäviöt pienenevät, hukkalämpöjä ja muita uusia lämmönlähteitä voidaan hyödyntää monipuolisemmin, ja lämmöntuotantoa voidaan tehostaa esimerkiksi lämmön talteenotolla savukaasuista. (Energiateollisuus ry, 2023c, s. 38)

2.4.6 Kaukolämpö- ja sähkömarkkinan yhteydet ja joustopotentiali

Kaukolämmön tuotteistaminen tarjoaa mahdollisuuksia, jotka hyödyntävät sekä sähkömarkkinoiden dynamiikkaa että kaukolämmön varastointikykyä. Sähkömarkkinoiden lyhyet, 15

minuutin kauppajaksot ohjaavat voimakkaasti tuotantohintoja, mikä vaikuttaa myös kaukolämmön tuotantoon ja käyttöön.

Sähkömarkkinat määrittävät sen, milloin ja millä tavalla lämpöä kannattaa tuottaa. Halvan sähkön aikana kaukolämpöä voidaan tuottaa esimerkiksi sähkökattiloiden tai lämpöpumpujen avulla ja myös ladata kaukolämpöakkuja. Kun sähkön hinta nousee ja sähkön tuotannosta CHP-laitoksella saa korkean hinnan, lämmöntuotanto on sähköntuotannon sivutuotteena erityisen edullista.

Varaston purkaminen kannattaa ajoittaa ajankohtaan, jolloin lämmöntuotannon hinta on korkeimmillaan. Korkean hinnan ajanjakso määräytyy sen perusteella, kuinka pitkälle tuotantokustannukset ovat ennakoitavissa. Näihin kustannuksiin vaikuttavat muun muassa polttoaineiden hinnat, valmistustapa, yksikön hyötysuhde, yhteistuotannon sähkön myyntihinta sekä sähkön joustomarkkinat. Kun näitä tekijöitä tarkastellaan tietyllä ajanjaksolla, ne yhdessä muodostavat kokonaiskustannuksen, joka määrittää lämmöntuotannon hinnan vaihtelut. Varaston käyttö tulee optimoida markkinaolosuhteiden ja varastointikapasiteetin puitteissa siten, että tarkasteltavalla ajanjaksolla kokonaistuotantokustannus pysyy mahdollisimman edullisena.

Kaukolämmön varastointimahdollisuudet ovatkin merkittävä etu sähkömarkkinaaan verrattessa – sähkö kun on kulutettava käytännössä reaaliaikaisesti. Kaukolämmön tuotteistamisessa keskiöön nouseekin kyky hyödyntää varastoitua lämpöä ja sen avulla reagoida markkinoiden muutoksiin. Kaukolämmön tuotteistaminen voi elää ja kehittyä sähkömarkkinoiden hinnoittelun ohjaamana. Lämmön varastointimahdollisuus mahdollistaa tuotannon optimoinnin niin halvan kuin korkean sähkön hinnan aikaan. Tämä dynamiikka tekee kaukolämmöstä joustavan ja markkinalähtöisen energiaratkaisun. (Koivula, 2025)

2.4.7 Kaukolämpöverkoston kysyntäjousto

Lämmitysenergian tarve ei pysy tasaisena vuorokauden ympäri. Kaukolämmön käyttö vaihtelee yleensä sekä pitkällä aikavälillä, kuten vuodenaikojen ja ulkolämpötilojen mukaan, että lyhyemmällä aikavälillä, esimerkiksi viikoittaisen ja päivittäisen rytmin perusteella. Päivittäisessä kulutuksessa näkyy tavallisesti kaksi huippukohtaa: aamuisin, kun lämpimän käyttöveden tarve kasvaa ja ilmanvaihtojärjestelmät käynnistyvät, sekä iltpäivisin, kun ihmiset

palaavat kotiin työpäivän jälkeen. Nämä kulutuksen vaihtelut kasvattavat kustannuksia ja heikentävät kaukolämpöjärjestelmän toiminnan tehokkuutta. (VALOR, 2015 s. 5)

Tulevaisuuden kaukolämpöjärjestelmässä joustoilla on merkittävä rooli. On tärkeää huomata, että kysyntäjousto eroaa perinteisistä energiansäästötoimista, energiatehokkuuden parantamisesta ja energiankulutuksen rajoittamisesta. Kysyntäjoustopuutteen tavoitteena ei ole vähentää lämmönkulutuksen kokonaismäärää, vaan sen päämääränä on ajoittaa kulutus uudelleen siten, että koko kaukolämpöjärjestelmä toimii tehokkaammin ja optimaalisemmin. (VALOR, 2015 s. 5)

Kaukolämpöjärjestelmä pystyy mukautumaan kysynnän ja tuotannon vaihteluihin monin eri tavoin. Kun lämmön tarve siirtyy myöhemmäksi, lämpöä on varastoitava, jotta sitä voidaan hyödyntää myöhemmin. Varastoinnin mahdollisuuksia tarjoavat esimerkiksi erilliset lämpövarastot, verkoston putkisto sekä rakennusten rakenteisiin varastoituva lämpö. Lämpöenergian varastointi tuo joustavuutta kiinteistön lämmitykseen. Varastoinnin avulla lämmöntarvetta voidaan tilapäisesti vähentää, kun kiinteistön kaukolämmön käyttöä voidaan osittain tai kokonaan korvata aiemmin varastoidulla lämmöllä. Kiinteistöä voidaan myös ennakkoon lämmittää tavallista enemmän, jotta lämpöä saadaan varastoitua. Näin kaukolämmön tarve joustojakson aikana pienenee, ja kiinteistöön haluttu minimilämpötila voidaan ylläpitää tehokkaasti. (Guelpa & Verda, 2021, s. 3) Kaukolämpöverkostoon sopivista energian varastointiratkaisuista lämmön varastointi suuressa mittakaavassa on taloudellisin vaihtoehto. (Työ- ja elinkeinoministeriö, 2022, s. 198)

2.4.8 Kiinteistöjen saneeraus & uudisrakentaminen

Euroopan Unionin uusittu rakennusten energiatehokkuusdirektiivi tuli voimaan toukokuussa 2024. Jäsenvaltioilla on aikaa kaksi vuotta saada direktiivi osaksi kansallista lainsäädäntöä, eli muutokset on tehtävä toukokuuhun 2026 mennessä. Direktiivin tavoitteena on rakennusten kasvihuonekaasupäästöjen ja energian loppukulutuksen vähentäminen vuoteen 2030 mennessä sekä pitkän aikavälin vision asettaminen rakennuksille kohti EU:n ilmastoneutraaliutta vuoteen 2050 mennessä.

Direktiivi ohjaa uudisrakentamisen sekä saneeraamisen toimenpiteitä, ja rakennusvalvonta varmistaa, että säädöksiä noudatetaan. Kaikkien uusien rakennusten tulee olla päästöttömiä

vuodesta 2030 alkaen, mutta julkisten rakennusten osalta vaatimus astuu voimaan jo vuonna 2028. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että rakennusten lämmitykseen ei enää käy kaikki polttoaineet ja lämmitysmuodot.

Olemassa olevien rakennusten energiatehokkuuden on parannuttava asteittain. Esimerkiksi muiden kuin asuinrakennusten osalta 16 % energiatehokkuudeltaan heikoimmista rakennuksista on kunnostettava vuoteen 2030 mennessä, ja 26 % vuoteen 2033 mennessä. Asuinrakennusten energiatehokkuuden parantamiseksi EU-maiden on toteutettava koko rakennuskannan asteittainen peruskorjaus, jonka tulee vähentää rakennusten keskimääräistä primäärienergian käyttöä vähintään 16 % vuoteen 2030 mennessä ja 20–22 % vuoteen 2035 mennessä. (Euroopan parlamentti, 2025)

Direktiivi tukee myös kaukolämmön aseman säilymistä vahvana, sillä se ohjaa kohti päästöttömiä ja energiatehokkaita ratkaisuja, joissa kaukolämpö voi monipuolisen ja vähäpäästöisen polttoainevalikoimansa ansiosta tarjota direktiivin vaatimuksiin sopivan vaihtoehdon.

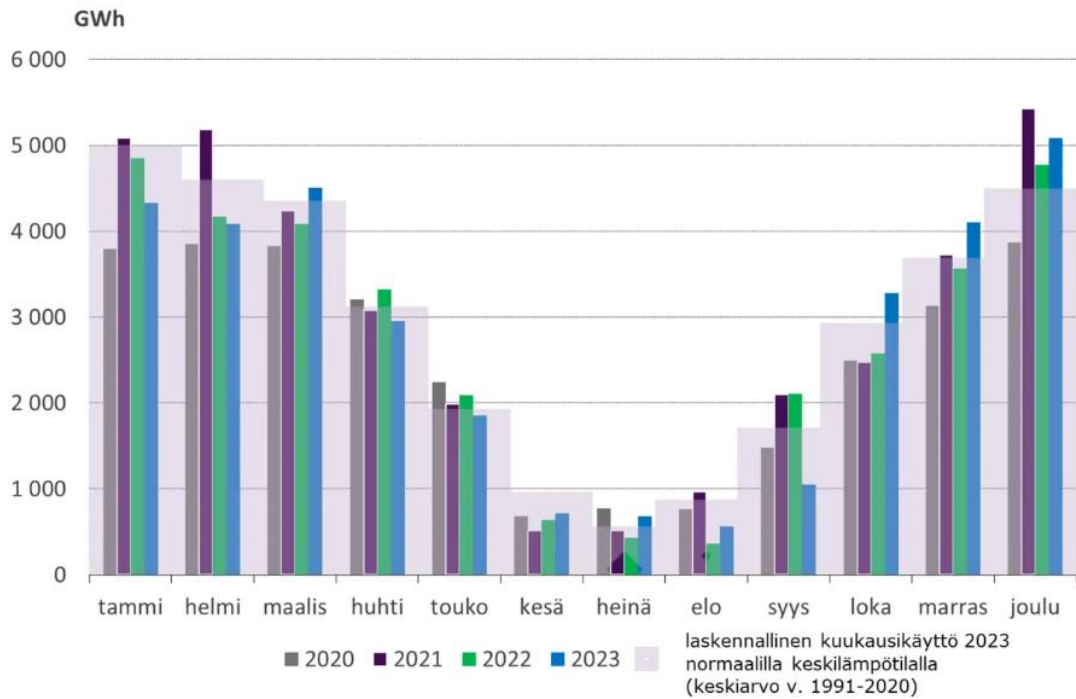
3 Kaukolämmön kysyntäjousto

Kaukolämmön kysyntäjoustolla tarkoitetaan kaukolämmön kulutuksen ja lämmitystarpeen ajoittamisen säätelyä siten, että asiakkaiden kokema palvelun laatu pysyy ennallaan. Kysyntäjouston keskeisenä tavoitteena on siirtää lämmöntarpeen kulutushuippuja suotuisampaan ajankohtaan niin, että energiajärjestelmän tasolla voidaan saavuttaa kustannussäästöjä tai muita hyötyjä.

3.1 Kaukolämmön tarve

Kaukolämmön tarpeen määrittävät rakennusten (patteriverkon ja ilmastoinnin) sekä käyttöveden lämmitys. (Koskelainen et al., 2006, s. 41)

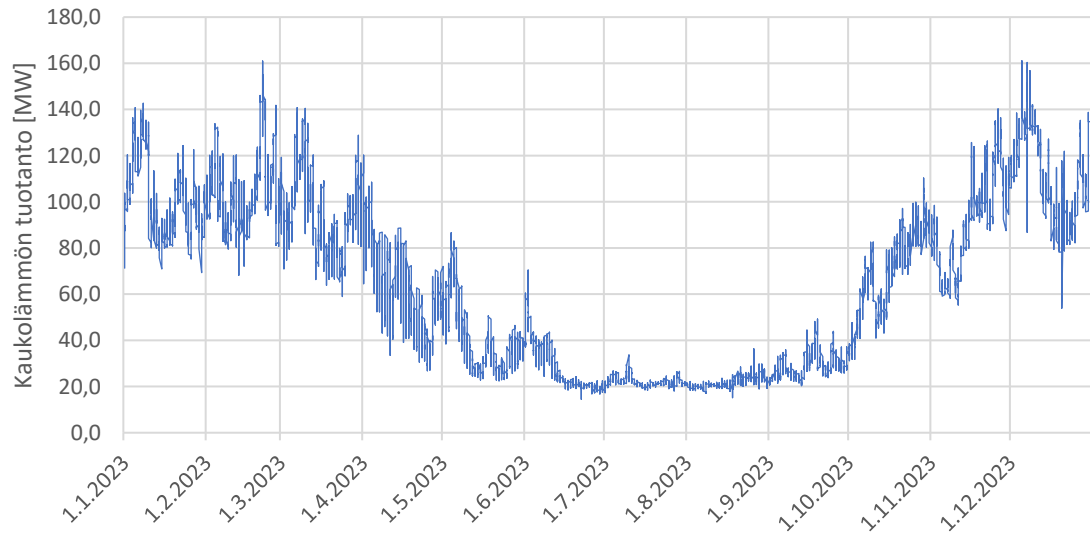
Yleensä kaukolämmön kulutus vaihtelee sekä vuodenaikojen ja ulkolämpötilan että viikko- ja päivärytmin mukaan. Talvella, erityisesti kovien pakkasten aikaan, kaukolämmön kulutus on suurimmillaan vuositasolla tarkasteltuna, ja päivätasolla kulutus on korkeimmillaan aamuisin, kun lämpimän käyttöveden tarve on suuri, ja ilmanvaihtojärjestelmät käynnistyvät. Kulutuksen vaihtelu aiheuttaa lisäkustannuksia kaukolämpöjärjestelmälle samalla heikentäen sen tehokkuutta. Muuttuvan lämmöntarpeen takia tarvitaankin kaukolämmön kysyntäjoustoja, jonka toimenpiteillä pyritään tasoittamaan kuormitusta. Tavoitteena on saada kaukolämpöjärjestelmä toimimaan tehokkaammin niin, että kaukolämpöenergian kulutus olisi tasaisempaa. (VALOR, 2015. s. 5)



Kuva 11. Kaukolämmön kulutusvaihtelu kuukausien mukaan (Energiateollisuus ry, 2024)

Kuten kuvasta 11 huomataan, kaukolämmön tarve vaihtelee kuukausien ja vuosien välillä. Tässä huomataan sääolosuhteiden vaikutus kaukolämmön kulutukseen – esimerkiksi vuoden 2020 tammi-, helmi-, ja joulukuussa kaukolämmön tarve on ollut selkeästi vähäisempi, kuin vastaavina kuukausina muina vuosina. Ilmatieteen laitoksen vuosiraportissa todetaankin, että vuoden 2020 talvi oli poikkeuksellisen lauha koko maassa. (Ilmatieteen laitos, 2025)

Vaikka eroja kaukolämmön kulutuksessa on havaittavissa vuosittaisessa ja kuukausittaisessa kulutuksessa, suurin osa vaihtelusta tapahtuu kuitenkin nopeammalla ajanjaksolla. Hetkellinen tehontarve siis vaihtelee voimakkaammin, kuin kuukausittainen kulutus, kuten kuvasta 12 voidaan huomata.



Kuva 12. Tehontarpeen vaihtelu Lappeenrannan Energian kaukolämpöverkostossa vuoden 2023 aikana

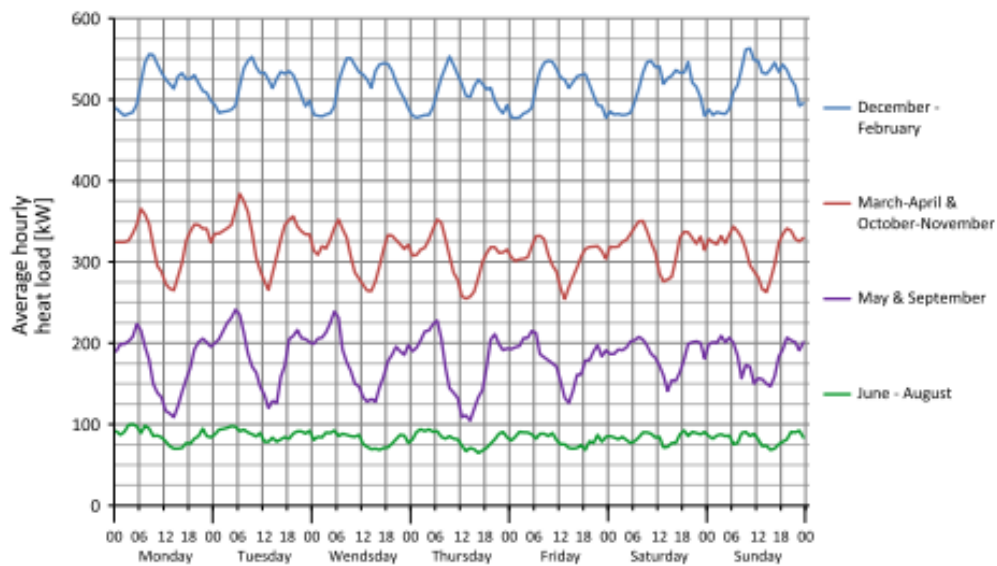
Lisäksi vaihtelua kaukolämmön kulutukseen aiheuttaa tyypilliset viikko- ja päivärytmit. Viikonloppuisin kulutus on tyypillisesti matalampaa. Kaukolämmön kulutuksen aamuhuiput johtuvat ilmastointilaitteiden käynnistymisestä ja lämpimän käyttöveden kulutuksesta, iltahuiput aiheutuvat pääosin lämpimän käyttöveden kulutuksesta. Yöaikana kulutus vähenee sisälämpötilan alenemisen vuoksi. (Koskelainen et al., 2006, s. 42)

3.2 Asiakaskiinteistöjen vaikutus kaukolämmön kulutukseen

Kaukolämmön kysyntäjoustopu suunnittelussa on tärkeää huomioida, että eri asiakaskiinteistöjen kulutuskäyttäytyminen vaihtelee monien tekijöiden, kuten rakennuksen ominaisuuksien ja käyttötarkoituksen, mukaan. Esimerkiksi suurimmassa osassa asuinrakennuksia kaukolämmön kulutukseen vaikuttavat pääasiassa lämpimän käyttöveden tarpeen vaihtelut sekä ulkolämpötila ja auringonpaiste. Tämä näkyy kulutuksessa suhteellisen pieninä huippuina aamuisin ja iltaisin. Asuinrakennusten lämmönkulutus vaihtelee eniten keväällä ja syksyllä, jolloin ulkolämpötilan vaihtelut ovat suurimmillaan. Sen sijaan merkittävämpiä päivittäisiä ja viikoittaisia kulutusvaihteluita esiintyy kiinteistöissä, joissa on käytössä energiatehokkuutta parantavia järjestelmiä, kuten aikasäädetty ilmanvaihto tai yöaikainen lämpötilan laskeaminen. Tällaisia kiinteistöjä ovat esimerkiksi julkiset rakennukset ja

teollisuusrakennukset. Nämä rakennukset soveltuvat hyvin kysyntäjoustoon, sillä niiden lämmönkulutuksessa on selkeä rytmi, jossa kulutus on samanlaista aamuisin ja iltaisin. (VALOR, 2015, s. 9)

Yleensä asuinrakennuksissa sekä osassa sosiaali- ja terveystaluiden rakennuksissa, kuten sairaaloissa, kaukolämmön käyttö pysyy tasaisena, koska lämmitys on jatkuvaa eikä energiansäästötoimenpiteistä aiheudu kulutuksen vaihteluita. (Gadd & Werner, 2013, s. 178)

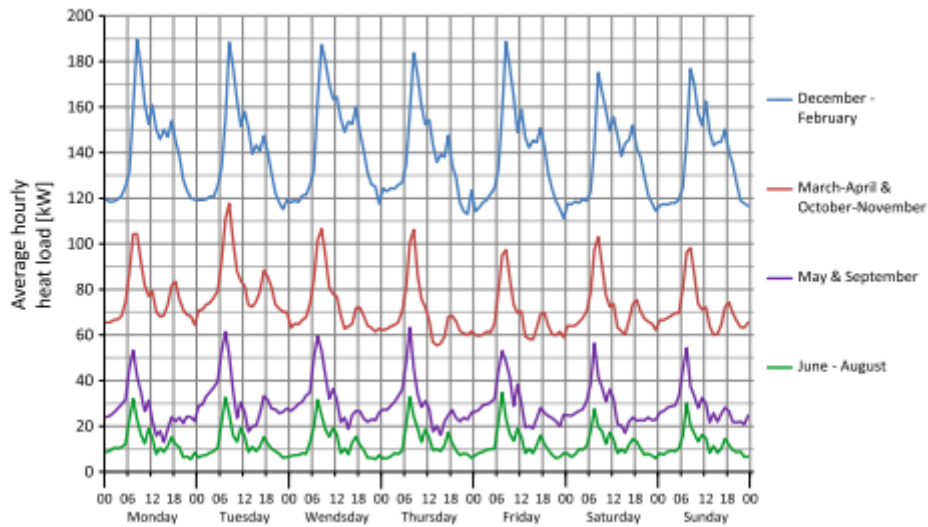


Kuva 13. Kaukolämmön kulutusvaihtelu kerrostaloasunnossa (Gadd & Werner, 2013, s. 179)

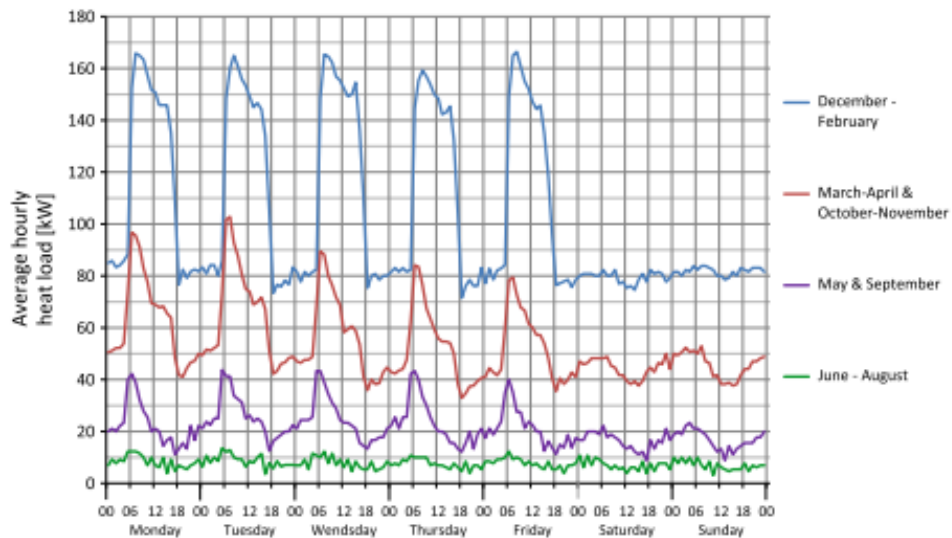
Muissa rakennuksissa, kuten osassa sosiaali- ja terveystaluiden rakennuksissa sekä teollisuusrakennuksissa, kaukolämmön kulutus vaihtelee merkittävästi. Tämä johtuu siitä, että osa rakennuksista on käytössä vain toimistoaikoina maanantaista perjantaihin, kun taas toiset toimivat ympäri vuorokauden. Lisäksi joillakin teollisuuslaitoksilla syntyy ylijäämälämpöä, mikä voi osaltaan vähentää niiden ulkoisen lämmöntarpeen määrää.

Mikäli rakennuksessa ei ole toimintaa öisin tai viikonloppuisin, ilmanvaihdon käyttö voidaan ajastaa energiatehokkuuden parantamiseksi. Jos ilmanvaihtoa rajoitetaan tiettyinä aikoina, sen käynnistäminen aiheuttaa vastaavasti hetkellisen kaukolämmön kysyntäpiikin. Teollisuusrakennuksissa käyttöveden kulutus on yleensä vähäistä verrattuna asuinrakennuksiin, mikä tarkoittaa, että kesäaikainen lämmönkulutus, jolloin tilojen lämmitystä ei tarvita, pysyy matalana. (Gadd & Werner, 2013, s. 178–179)

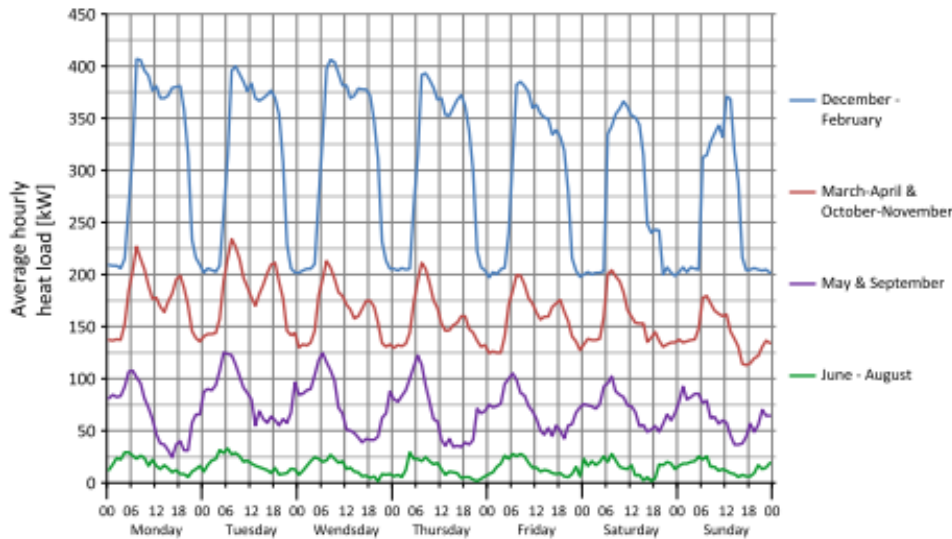
Alla on esitetty kaukolämmön kulutusvaihtelua erityyppisissä kiinteistöissä.



Kuva 14. Kaukolämmön kulutusvaihtelu julkisissa kiinteistöissä, kun energiansäästötoimenpiteitä toteutetaan yöaikaan (Gadd & Werner, 2013, s. 179)



Kuva 15. Kaukolämmön kulutusvaihtelu julkisissa kiinteistöissä, joissa ilmanvaihto rajoitetaan öiden sekä viikonloppujen ajaksi (Gadd & Werner, 2013, s. 180)



Kuva 16. Kaukolämmön kulutusvaihtelu julkisissa kiinteistöissä, joissa ilmanvaihtoa rajoitetaan yöaikaan.

Kysyntäjoustoja suunniteltaessa on tärkeää huomioida verkoston rakennuskanta ja kiinteistöjen kyky toteuttaa joustopyyntöjä. Kun joustot kohdistuvat patteriverkoston lämpötilan hetkelliseen alentamiseen, monet kiinteistöt, niin asuinkiinteistöt kuin julkisetkin kiinteistöt, voivat reagoida niihin ilman merkittävää vaikutusta sisälämpötilaan. Lämpötila pysyy vakaina tai laskee vain hieman, eikä lyhytaikainen lämmönsaannin vähentäminen aiheuta käyttäjille epämukavuutta. Lyhytaikaisella rajoituksella tarkoitetaan muutaman tunnin ajanjaksoa, jolloin lämmönsaantia ei katkaista kokonaan, vaan sitä säädetään tilapäisesti.

Esimerkiksi Aalto-yliopiston tutkimuksessa patteriverkoston menoveden lämpötilaa laskettiin 5–20 °C ajanjaksoilla, jotka kestivät 1–4 tuntia kerrallaan. Suurimmillaan huonelämpötila muuttui 1,04 °C, ja vaikutuksen nopeus vaihteli huoneen sijainnin mukaan. Nurkkahuoneissa jouston vaikutukset näkyivät nopeammin kuin muissa tiloissa. Kokeilun tuloksena energiansäästön arvioitiin olevan lähes 30 MWh.

Käyttäjätyytyväisyystutkimuksessa ei havaittu suoraa yhteyttä kysyntäjouston ja tyytyväisyyden välillä. Tämä viittaa siihen, että lämpötilamukavuuteen vaikuttavat myös monet muut tekijät, kuten rakennusautomaatiojärjestelmän toiminta ja yksilöllinen kokemus sisäilmaolosuhteista. (Aalto-yliopisto, 2021)

3.3 Miten joustoja syntyy

Järjestelmätason hyötyjen maksimoinnin ja ennakoitavuuden varmistamiseksi kysyntäjoustop hallinnan tulisi olla kaukolämpöyhtiön vastuulla. Tämä tarkoittaa, että kaukolämpöyhtiö lähettää signaalin, jonka perusteella kysyntäjoustop osallistuvat kiinteistöt toteuttavat toimenpiteitä kaukolämpötehon hetkellisen tarpeen vähentämiseksi. Toimenpiteet tulee toteuttaa ennakoidusti ja siten, että asukkaiden kokema palvelutaso säilyy muuttumattomana. (VALOR, 2015, s. 3)

Palvelun laadun säilyttämiseksi joustotoimenpiteet ovat suositeltavia kohdistaa ensisijaisesti patteriverkoston veden lämpötilan tilapäiseen laskemiseen. Ilmanvaihdon tai lämpimän käyttöveden rajoittaminen voi aiheuttaa asiakkaille epämukavuutta, sillä ilmanvaihdon vähentäminen saattaa johtaa kosteuden lisääntymiseen ja heikentyneeseen sisäilman laatuun. Lisäksi, jos kiinteistössä ilmenee homeongelmia, kaukolämpöyhtiö saatetaan katsoa korvausvelvolliseksi, vaikka ilmanvaihto ei olisikaan ongelmien varsinainen tai ainoa syy. Myös patteriverkoston veden virtauksen rajoittaminen voi aiheuttaa haasteita, sillä se saattaa häiritä järjestelmän tasapainoa ja johtaa epätasaiseen lämmön jakautumiseen kiinteistössä. (VALOR, 2015, s. 25) Myös lattialämmityksen kiertoveden lämpötilaa voidaan laskea samoilla periaatteilla, kuin patteriverkoston. Lattialämmitetyt rakennukset varaavat lämpöä hyvin, joten kysyntäjoustopjaksotkin voivat olla pitkiä.

Kysyntäjoustop ohjaaminen voidaan toteuttaa esimerkiksi dynaamisen hinnoittelun avulla, suorana massaohjaussignaalina kiinteistöjen kaukolämpökeskuksille tai säännöllisenä aikaperusteisena ohjauksena. Dynaamisessa hinnoittelussa kaukolämpöyhtiö antaa kiinteistöille omiin tuotantokustannuksiinsa perustuvat kaukolämmön hinnat esimerkiksi joka tunnille tai reaaliajassa. Kiinteistöt reagoivat hintasignaaliin kaukolämpökeskukseen syötetyn algoritmin mukaisesti rajoittaen lämmönkulutusta kalleimpien tuntien aikana. Dynaamisen hinnoittelun heikkous on se, että ilman reaaliaikaista hinnoittelua se voi johtaa kaikkien kiinteistöjen käyttäytymiseen samalla tavalla, mikä saattaa jopa jyrkentää kaukolämmön kuormituspiikkejä. Siispä signaaleja pitäisi porrastaa niin, ettei ajoitus ole samanaikainen kaikille. Suora massaohjaussignaali annetaan etähallittavien kiinteistöjen kaukolämpökeskuksille, jotka reagoivat annetun signaalin mukaisesti rajoittaen patterikierron veden lämpötilaa. Tämä ohjaustapa soveltuu vain uudempiin kiinteistöihin, joiden kaukolämpökeskuksia pystytään ohjaamaan etänä. Säännöllinen aikaperusteinen ohjaus soveltuu kiinteistöihin, joissa

etäohjausta ei ole. Tällä ohjaustavalla lämpökeskus ohjeistetaan laskemaan patterikierron veden lämpötilaa säännöllisesti samaan aikaan. (VALOR, 2015, s. 25)

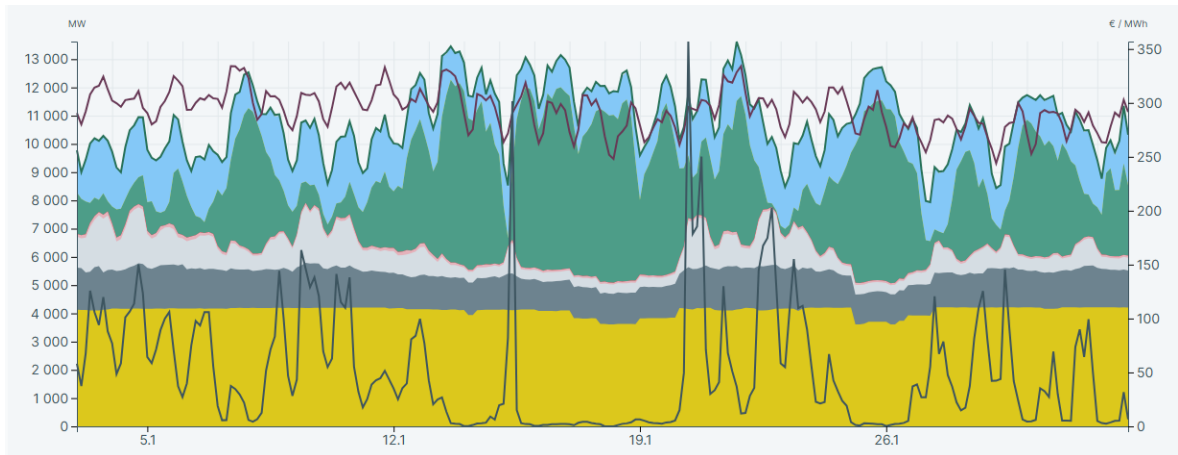
3.4 Kysyntäjouaston vaikutukset kaukolämpötoimijoille

Kaukolämpötoiminnan kannattavuus perustuu ensisijaisesti peruslämmön toimitukseen, kun taas huippulämmön tuottaminen on usein tappiollista ja parhaimmillaankin vain kustannusneutraalia. Erityisesti nopeat kulutuksen vaihtelut tuovat lisäkustannuksia ja heikentävät järjestelmän kokonaisyhyötysuhdetta. Jotta kulutuksen vaihteluun voidaan tehokkaasti vastata, kaukolämpöjärjestelmä tarvitsee joustavan tuotantorakenteen tai kysyntäjouaston kaltaisia ratkaisuja. (VALOR, 2015, s. 11)

Kaukolämpötoiminnan kannattavuus riippuu peruskuormalaitosten korkeasta käyttöasteesta, toimintavarmuudesta ja hyötysuhteesta. Näitä voidaan parantaa muun muassa vähentämällä voimalaitosten käynnistyksiä ja alasajoja sekä maksimoimalla niiden yhtäjaksoinen käyttö täydellä teholla. Lisäksi kannattavuuteen vaikuttavat tuotannon, verkoston ja asiakaslaitteiden oikea mitoitus sekä optimaalinen polttoainevalinta. (VALOR, 2015, s. 11)

Merkittävä tekijä kaukolämmön kannattavuuden parantamisessa on huippulämpölaitosten käytön minimointi, erityisesti silloin, kun ne käyttävät fossiilisia polttoaineita. Toinen keskeinen tekijä on tasapainoinen kaukolämpöverkko, joka tarkoittaa optimaalista kuormitusta sekä rakenteellista kestävyyttä esimerkiksi putkirikon sattuessa. Verkossa ei tulisi olla merkittäviä vikoja tai pullonkauloja, jotka heikentävät sen toimintaa. Kaukolämmön kysyntäjoustolla voidaan vaikuttaa myönteisesti kaikkiin näihin tekijöihin, edistäen järjestelmän taloudellisuutta ja tehokkuutta. (VALOR, 2015, s. 11)

Kaukolämpötoimijan näkökulmasta kysyntäjoustolla pyritään siirtämään ja tasaamaan kulu- tushuippuja, jotta kaukolämpöjärjestelmän operointi kokonaisuudessaan on tehokkaampaa. (VALOR, 2015, s. 11) Lisäksi on tärkeää huomata, että eri verkostoilla on vaihtelevat mah- dollisuudet toteuttaa joustotoimenpiteitä ja hyödyntää niitä. Esimerkiksi verkostossa, jossa on vain yksi öljykattila, joustoista ei synny merkittäviä kustannussäästöjä, sillä polttoaine hankitaan kerralla suurina erinä kiinteään hintaan, eikä sähkön hinta vaikuta tuotantokustan- nuksiin. Tästä syystä kysyntäjousto koskee pääasiassa verkostoja, joissa tuotantomahdelli- suudet ovat monipuoliset ja kaukolämpö tuotetaan joko CHP-laitoksella tai sähkökattilalla.



Kuva 17. Sähkön tuotanto, kulutus sekä hinta vuorokausimarkkinoilla tammikuun 2025 aikana (Fingrid, 2025)

Kuten kuvasta 17 nähdään, sähkön tuotanto, kulutus ja hinta vuorokausimarkkinoilla vaihtelevat päivittäin. Suurimmat erot ilmenevät hinnassa: korkeimmillaan sähkö on maksanut 356,9 €/MWh (20.1.2025 klo 09), kun taas alimmillaan se on ollut ilmaista, 0 €/MWh (18.1.2025 klo 06). Tämä hintavaihtelu vaikuttaa suoraan kaukolämmön tuotantoon ja sen kustannuksiin.

CHP-laitoksilla sähkön tuotannon kannattavuus määrittää, kuinka paljon kaukolämpöä syntyy samanaikaisesti. Korkean sähkön hinnan aikana CHP-laitokset tuottavat enemmän sähköä, mikä lisää myös kaukolämmön tuotantoa ja tekee siitä edullisempaa. Vastaavasti, kun sähkön hinta on alhainen tai nolla, sähkön tuotantoa saatetaan vähentää, jolloin kaukolämmön lisätarve täytyy kattaa erillisillä lämpökattiloilla tai lämpöpumpuilla. Tämä nostaa polttoainekustannuksia ja vaikuttaa kaukolämmön tuotannon tehokkuuteen ja hintaan.

Kaukolämmön kysyntäjoustop tavoitteena on vähentää kulutusta silloin, kun lämpöä joudutaisiin tuottamaan kalleimmilla polttoaineilla, ja siirtää kulutus edullisempaan ajankohtaan. Sähkön hinnan vaihtelu vaikuttaa suoraan kaukolämmön tuotantomahdollisuuksiin ja hintaan, mikä luo haasteita kaukolämpötoimijoille. Koska polttoainevalikoima on monipuolinen ja hintatasot vaihtelevat, kaukolämmön hinnoittelu on keskeinen haaste: kuluttajalle hinta pysyy vakiona, mutta tuottajalle se vaihtelee tuotantokustannusten mukaan. Tämä epäsuhta voi tehdä nykyisestä hinnoittelumallista ongelmallisen, ja tulevaisuudessa voi olla tarpeen ottaa käyttöön joustavampia hinnoittelumalleja kaukolämpöjärjestelmän tukemiseksi.

Kaukolämmön hintaan vaikuttavat polttoaineen hinnan lisäksi myös fossiilisista polttoaineista aiheutuvien hiilidioksidipäästöjen kustannukset. Kaukolämmön tuotannossa hintaan vaikuttaa marginaalihinta, eli hinta määräytyy sen perusteella, mikä on kallein käytössä oleva tuotantotapa. Jos kaukolämmön tuotantokustannuksia halutaan alentaa, kalleimmat tuotantomuodot on poistettava kysyntäjouaston keinoin – säästöä syntyy siis ennen kaikkea silloin, kun kalleimmat ja saastuttavimmat lämmöntuotantomuodot korvataan edullisemmilla ja vähäpäästöisimmillä vaihtoehdoilla.

Säästöjä syntyy myös siitä, että aiemmin hukkaan menneestä yllämmöstä ei enää aiheudu kustannuksia, kun uusi järjestelmä optimoi kiinteistön sisälämpötilan keskilämpötilan niin, että tarpeeton lämmönkulutus vähenee. Tämä tarkoittaa sitä, että energiayhtiöllä ei voi enää myydä ylimääräistä lämpöä, joka aiemmin päätyi hukkaan. Kun verkostossa ei synny hukkalämpöä, kaukolämmön tuottajalla ei ole mahdollisuutta ansaita ylimääräisiä tuloja yllämmön myynnistä.

Kysyntäjouaston hyötyjä kaukolämpötoimijoille ovat mm.

- Energian hankinta- ja -tuotantokustannusten minimointi
- Tasaisempi kysyntä johtaa siihen, että laitosten ylös- ja alasajot vähenevät
- Tuotantokapasiteettia saadaan hyväksikäytettyä tehokkaammin, kun kuormitusaste lisääntyy
- Lämmön tuotantokustannukset saadaan alhaisemmaksi, kun suurempi osa lämmöstä voidaan tuottaa yhteistuotannolla
- Lämpöä voidaan tuottaa yhteistuotannolla, lämpöpumpuilla ja sähkökattiloilla sähkön hinnan, ei lämmön tarpeen, mukaan
- Kaukolämpöverkoston laajennuksia voidaan lykätä
- Järjestelmän investointikulut pysyvät alhaisempana, kun kaukolämpöverkkoa on mahdollisuus käyttää tehokkaammin kysyntäjouaston ansiosta

(VALOR, 2015, s. 14)

3.5 Kysyntäjoustop vaikutukset asiakkaalle

Asiakkaat ovat luonnollisesti kiinnostuneita lähinnä omasta lämmön kulutuksestaan ja sen kustannuksista, eivät niinkään koko järjestelmän toiminnan järkevyydestä. Kysyntäjoustop toteutusta huomioidessa täytyykin huomioida se, miten asiakkaita kannustetaan sellaiseen kysyntäjoustop, joka muodostaa hyötyjä koko järjestelmän tasolla, eikä vain asiakkaalle itselleen, esimerkiksi yönaikaiset lämmönpudotukset kiinteistöissä, mikä laskee kustannuksia. (VALOR, 2015, s. 8)

Asiakkaalle koituvia hyötyjä kysyntäjoustopista on mm.

- Lämmityksen käyttökulut pienenevät, jos joustavan kulutuksen ansiosta lämpö- tai pumppausenergiaa tarvitaan vähemmän.
- Energialasku pienenee, jos asiakas vähentää lämmön käyttöä kalliina aikoina ja lisää kulutusta edullisempina ajankohtina. Tämä säästö syntyy hinnoittelutavan ansiosta.
- Kuluttajille tarjottavat palvelut voivat parantua uusien hinnoittelu- ja liiketoimintamallien myötä.

(VALOR, 2015, s. 14)

3.5.1 Miten asiakas saadaan mukaan joustavaan kaukolämpöjärjestelmään

Käyttäjien saaminen mukaan joustoihin edellyttää kysyntäjoustop huolellista tuotteistamista, jossa joustot esitellään asiakkaille selkeinä ja houkuttelevina vaihtoehtoina. Käyttäjäkokeuksen täytyy pysyä vaivattomana – esimerkiksi älykkäät lämmitysjärjestelmät, jotka optimoivat kulutuksen asiakkaan puolesta, tekevät siirtymästä helppoa ja huomaamatonta. Asiakkaan on ymmärrettävä, mitä konkreettista hyötyä joustoista on hänelle – usein merkittävin houkutin on kustannussäästöt, kuten pienempi lämmityslasku, jos kulutusta voidaan siirtää edullisemmille tunneille. Tämä muutos toki tarkoittaisi sitä, että joustavan kaukolämmön yksikköhinta olisi perinteistä kaukolämpöä halvempi, vaikka asiakkaalle lämpöä myytäisiinkin yhä kiinteään yksikköhintaan. Kiinteä yksikköhinta on kaukolämmön etu, ja moni pitää Pelkkä informointi ei kuitenkaan riitä, vaan asiakasta on usein tarpeen ohjata valitsemaan joustavat ratkaisut. Kaukolämmön myyjä voi tehdä joustavan hinnoittelun

oletusvaihtoehdoksi tai jopa lopettaa sellaisten sopimuksien myymisen, joissa asiakkaan ei tarvitse joustaa kaukolämmön kulutuksessaan. Jos perinteistä, kiinteähintaista sopimusta ei enää ole tarjolla, asiakkaat siirtyvät luonnollisesti joustavampiin ratkaisuihin.

4 Kysyntäjoustojen luominen verkostoon

4.1 Hankkeen esittely, tavoitteet ja tutkimusmenetelmät

BeyondEE-hanke on yhteistyöprojekti, jossa on mukana Lappeenrannan kaupunki sekä Lappeenrannan Energia ja Lappeenrannan Asuntopalvelu. Hanke on osa Euroopan unionin Net-ZeroCities-ohjelmaa, jonka tavoitteena on pilotoida päästöttömiin ratkaisuihin tähtääviä toimenpiteitä eurooppalaisissa kaupungeissa.

BeyondEE-hankkeessa käsitellään integroituja digitaalisia ratkaisuja kaukolämmön optimointiin, ja hankkeen tavoitteena on optimoida kaukolämmön kulutus asuin- ja palvelurakennuksissa.

Yksi hankkeen päämääristä on parantaa rakennusten käyttäjäkokemusta vähentämällä tarpeetonta lämmitystä. Lisäksi hanke tarjoaa mahdollisuuden seurata rakennusten lämpöolosuhteita sekä tunnistaa lämmityslaitteiden huoltotarpeet ajoissa.

Hankkeen tavoitteena on vähentää suoria päästöjä asentamalla kiinteistöihin älykäs lämmityksen ohjausjärjestelmä. Samalla pyritään saavuttamaan epäsuoria päästövähennyksiä tarjoamalla kaukolämpöjärjestelmälle joustomahdollisuuksia ilman, että rakennusten sisäilman laatu kärsii. Lisäksi hankkeella edistetään kysyntäjoustoratkaisujen laajempaa käyttöönottoa keskitetyn lämmityksen yhteydessä. Tavoitteena on kehittää malli, jossa energiansäästöistä syntyvät hyödyt jaetaan oikeudenmukaisesti järjestelmätoimittajien, kiinteistönomistajien ja energiayhtiöiden kesken. Hankkeessa laaditaan myös menettelyohje siitä, miten kysyntäjoustoja voidaan tuotteistaa ja toteuttaa kaukolämmitysjärjestelmissä. (GreenReality, 2025)

Työn tavoitteena on selvittää, millä menetelmillä voidaan arvioida kysyntäjouston vaikutuksia Lappeenrannan kaukolämpöverkostossa. Arviointi perustuu energiatase- ja päästölaskentaan, ja siinä hyödynnetään kuutta erilaista KPI-mittaria. KPI-mittari, Key Performance Indicator, on suorituskykymittari, jota käytetään prosessin tehokkuuden ja tavoitteiden

saavuttamisen arviointiin ja seurantaan. KPI-mittarit tarjoavat mitattavia arvoja, minkä vuoksi niiden tuottamat tulokset ovat merkityksellisiä päätöksenteossa. Kokonaisuudessaan tavoitteena on optimoida lämmön ja sähkön kulutus ja tuotanto, sekä vähentää kuluja ja fossiilisten polttoaineiden käyttöä 5–10 %.

Käytetyt KPI-mittarit ovat

- Kaukolämpöverkon optimoituminen. Tällä kuvataan sitä, miten hyvin joustopyynnöt osuvat sellaisiin ajankohtiin, kun kaukolämpöverkon lämpötilaa nostetaan. Tämän mittarin avulla selvitetään, minkä verran suhteessa joustotehoa saataisiin, jos kaikki kiinteistöt joustaisivat, sekä saavutettaisiinko toimenpiteillä säästöjä kaukolämpöveden menolämpötilassa. Mittarin avulla mitataan verkoston vuosittaista energiankulutusta [kWh/v] sekä optimoinnin tuottamaa säästöä energiankulutuksessa.
- Uusiutuvan energian osuus. Tämän prosenttiosuuden avulla selvitetään, kuinka paljon fossiililla polttoaineilla tuotettuja kaukolämmön kysyntäpiikkejä on saatu karsittua tarkastelujakson aikana.
- Fossiilisten polttoaineiden käytön väheneminen. Tämän mittarin avulla lasketaan, kuinka paljon huippukuorman aikaan voidaan vähentää fossiilisten polttoaineiden käyttöä [MWh], kun varavoimalle (pienet lämpölaitokset, joissa on käytössä fossiilinen polttoaine) ei ole tarvetta.
- Kasvihuonekaasupäästöjen väheneminen vuositasolla. Tämä mittari laskee sähkön ja lämmön päästövaikutuksia [t CO₂-ekvivalenttia/v], kun säästetty energiamäärä kerrotaan päästölähteen ominaispäästökertoimella.
- Energiatehokkuuden muutos tarkastelujakson aikana. Tämän prosenttiosuuden avulla selvitetään, miten kiinteistön lämmitysenergian tarve pienenee.
- Asiakkaiden säästöt lämmityslaskuissa [€/kiinteistö]
- Jouston sähkömarkkinapäästövaikutus [kg CO₂]
- Jouston vaikutus keskimääräiseen tuotantohintaan [€/MWh]

Hankkeen tavoitteena on saavuttaa seuraavat energiategokkuuteen ja päästövähennyksiin liittyvät tulokset:

- Lämmönkäytön optimointi vähentäen kulutusta 5–7 %
- Kiinteistöjen päästöjen väheneminen 5 %
- Fossiilisten polttoaineiden käytön vähentäminen vähentämällä kulutushuippuja

Täysimittaiset vaikutukset määritetään skaalaamalla yhden rakennuksen saavutettu potentiaali 815 vastaavan kokoiseen rakennukseen Lappeenrannassa. Näiden rakennusten vuotuinen lämmönkulutus on yhteensä 390 GWh, mikä antaa pohjan arvioida toimenpiteiden kokonaisvaikutuksia laajemmassa mittakaavassa.

Skaalattuna nämä tavoitteet tarkoittaisivat seuraavia päästövähennyksiä ja tehostamisvaikutuksia:

- 5 % vähennys lämmönkulutuksessa vähentäisi vuosittaisia kokonaispäästöjä 13,3 Mton CO₂-ekvivalenttia.
- 1 % vähennys kaukolämmön jakeluhäviöissä vastaisi vuosittain 4 Mton CO₂-ekvivalenttia.
- 700 MWh huipputehon polttoaineoptimointi vähentäisi vuosittaisia päästöjä 135 tonnia CO₂-ekvivalenttia.

Tutkimuksessa arvioidaan, voidaanko toimenpiteiden skaalaamisella saavuttaa nämä tavoitteet laajemmassa rakennuskannassa. Verrokkikohteenä käytetään Lappeenrannan Asuntopalvelujen 9 kerrostalokiinteistöä, joista saatujen tulosten pohjalta tehdään laajempi mallinnus.

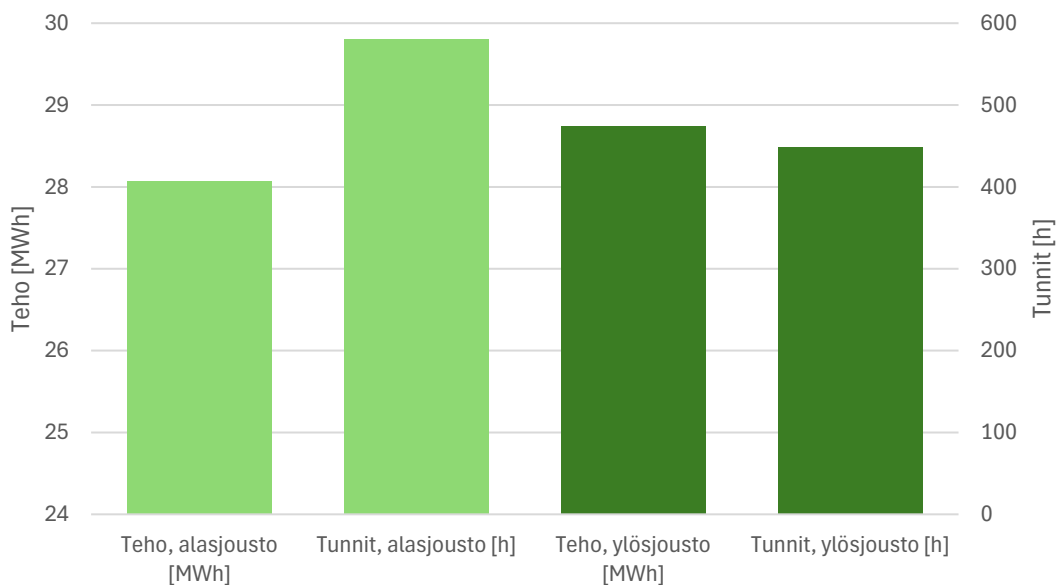
4.2 Tutkimusosuus

Tutkimus perustuu verkostosta kerättyyn monipuoliseen dataan. Tarkastelussa on hyödynnetty aikasarjoja joustopyynnöistä, jotka sisältävät eri energianlähteiden osuudet, sekä verkoston mittausdataa, erityisesti lämpötilatietoja. Lisäksi analyysissä on käytetty asiakkaiden laitetietoja sekä tuotantodataa, mukaan lukien päästövaikutuksiin ja tuotantokustannuksiin liittyviä tietoja.

4.2.1 Kaukolämpöverkon optimoituminen

Tarkastelun kohteena on alasjouston (tehon pienentämisen) ajoittuminen tilanteisiin, joissa kaukolämpöverkon menolämpötilaa nostetaan. Analyysi on tehty vertaamalla tuntisarjasta kaukolämpöverkoston menolämpötilaa joustopyyntöihin, eli onko asiakasta pyydetty rajoittamaan vai lisäämään lämmönkäyttöä kyseisellä ajanhetkellä.

Verkon menolämpötilaa nostettiin yhteensä 1029 tunnin ajan. Näillä hetkillä alasjousto pyydettiin 581 tunnin aikana, ja näiden tuntien aikana saavutettaisiin 28 070 kWh:n skaalattu energiansäästö. Tämä osoittaa alasjouston potentiaalisen energiatehokkuuden parantamisessa. Ylösjousto eli tehon kasvatusta verkon menolämpötilan noston kanssa saman aikaisesti pyydettiin vastaavasti 448 tunnin ajan, jolloin skaalattua tehoa tarvittaisiin 28740 kWh verran.



Kuva 18. Joustopyyntöjen jakautuminen menolämpötilan nostojen aikana (1.11.2024–31.1.2025)

Vaikka ylösjoustoan liittyvä teho on hieman alasjoustosta saavutettua tehoa suurempi, tulokset ovat kuitenkin hyviä ja odotetun kaltaisia, sillä alasjoustojen ajoittuminen hetkiin, jolloin lämpötilaa nostetaan, voi estää tai ainakin viivyttää tarvetta nostaa lämpötilaa. Näin ollen alasjouston vaikutus on positiivinen, eli joustojen luominen tukee energiatehokasta

verkon käyttöä. Alasjousto siis toimii tasapainottavana tekijänä, joka mahdollistaa pienemmän lämpötilan noston samassa tilanteessa.

Tarkasteltaessa alasjoustopuolteen vaikutusta verkon menolämpötilan muutosnopeuteen havaittiin, että kaikkien joustotuntien aikana joustopuolteen keskimääräinen vaikutus on n. 0,36 °C tunnissa. Eli hetkinä, jolloin jousto olisi täysimääräisesti käytettävissä, menolämpötilaa tarvitsisi nostaa 0,36 °C/h vähemmän.

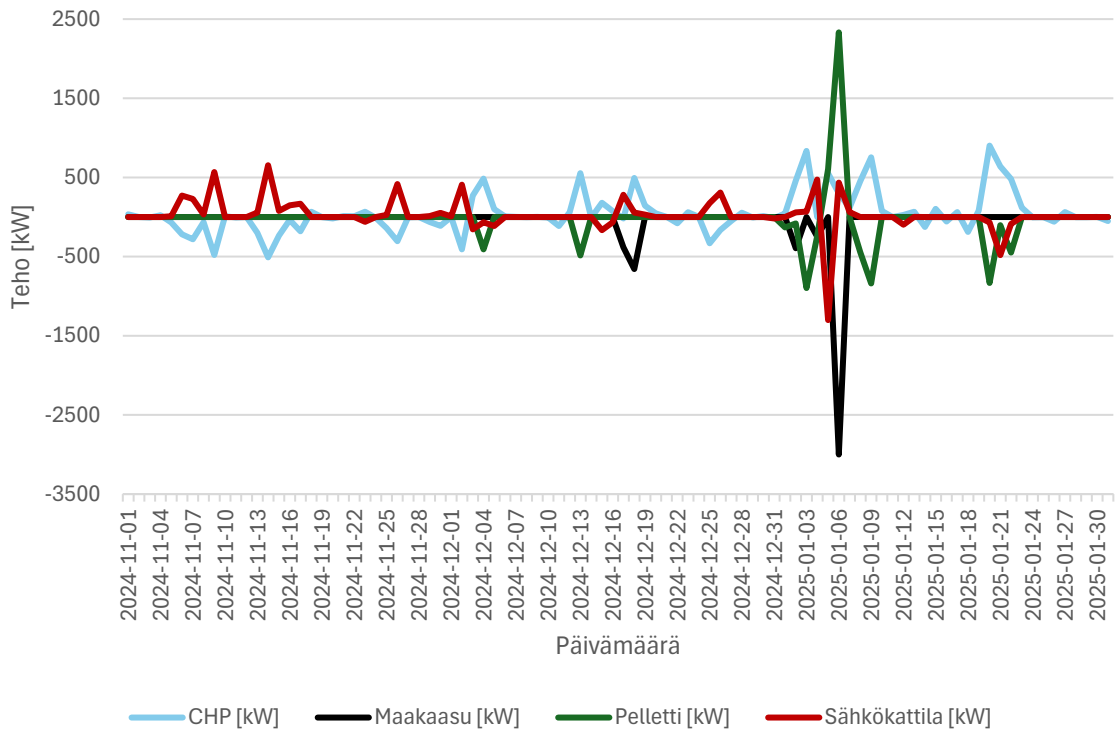
Vaikka kokonaisenergiämäärältään alas- ja ylösjoustopuolteen vaikutukset ovat suunnilleen samansuuruiset, niiden ajallinen jakauma ja verkon lämpötilaan kohdistuva vaikutus poikkeavat toisistaan merkittävästi, joka tarkoittaa sitä, että alasjoustopuolteen vaikutus verkostossa on ollut positiivinen.

Tarkastelujakson pituus 1.11.2024-31.1.2025 oli kestoaltaan 2208 tuntia, mikä vastaa noin neljäsosaa koko vuoden tunneista. Kun joustoa tapahtui 1029 tunnin aikana, voidaan vuositasoinen vaikutus arvioida kaksinkertaistamalla tämä, sillä huomioon otetaan vain lämmityskauden pituus ja näin esimerkiksi kesäajan vähäinen lämmöntarve jätetään tarkastelun ulkopuolelle. Niinpä vuosittaisen joustotuntien määrä olisi 2058 h.

Tarkastelujakson aikana keskimääräinen verkoston menolämpötila on ollut 85,3 °C, eli verkoston menolämpötilaa voitaisiin vuoden aikana vähentää yhteensä 741 °C ilman, että se heikentäisi lämmön toimitusta. Kun kaukolämpöputken lämpöhäviönä käytetään 0,3 % arvoa, joustojen vaikutus kokonaishäviöön olisi 0,035 %. Vaikka prosentuaalinen vaikutus lämpöhäviöihin on pieni, se on mitattavissa, ja yhdistettynä tuotettuun energiämäärään, se tukee joustomekanismin hyödyntämistä osana kaukolämmön toimitusta.

4.2.2 Uusiutuvan energian osuus

Lisäämällä alasjoustopuolteen verkostoon pyritään vähentämään tarvetta käynnistää niitä lämpölaitoksia, joissa on käytössä fossiilinen polttoaine. Kuva 19 alla esittää tarkastelujakson aikana, miten maakaasun tarve on ollut negatiivinen, kun tarvittava energiämäärä on pystytty tuottamaan uusiutuvilla energialähteillä.



Kuva 19. Eri tuotantomuotojen tehovaihtelut joustopilottin aikana

Tarkastelu on tehty vertaamalla alasjoustopilottin hetkiä niihin hetkiin, jolloin jousto on toteutettu maakaasua vähentämällä. Tarkastelujakson aikana fossiililla polttoaineilla tuotettuja kaukolämmön kysyntäpiikkejä on saatu karsittua 8,3 %.

Energiayksiköissä mitattuna maakaasua on saatu yhdeksässä joustopilottikohteessa vähennettyä 4,6 MWh verran 3 kuukauden tarkastelujakson aikana. Kun vaikutus skaalataan koko lämmityskaudelle (6 kuukautta) ja koko verkoston potentiaalisiin joustokohteisiin (815 kiinteistöä), vaikutus olisi 850 MWh, joka päästövähennyksenä vastaa 340 t CO₂-ekvivalenttia vuodessa. Päästövähennys on laskettu kertomalla maakaasun vähennyspotentiaali maakaasun päästökertoimella 55,81 t/TJ (Tilastokeskus, 2025).

4.2.3 Vaikutukset kiinteistöihin ja asiakkaille

Asiakaskohtaisia vaikutuksia tarkasteltiin vertaamalla kiinteistöjen lämmönkulutuksen muutosta sekä euromääräisiä vaikutuksia lämmityskustannuksiin. Arvioinnissa laskettiin muutokset lämmön tarpeessa megawattitunteina ja prosentteina sekä muutokset lämmityslaskussa euroina.

Laskelmat perustuivat normitetun lämmitysenergiankulutuksen kuukausittaiseen tarkasteluun lämmityskausilta 2022–2023 ja 2023–2024 (marraskuu–maaliskuu). Näiden kausien keskiarvoa verrattiin vuoden 2024–2025 vastaavan ajanjakson normitettuun kulutukseen. Normitettu lämmitysenergiankulutus määritettiin vähentämällä kuukausittaisesta kokonaislämmönkulutuksesta käyttöveden osuus ja kertomalla tulos normaalivuoden lämmitystarveluvun (Ilmatieteen laitos, 2025b) ja tarkasteltavan kuukauden lämmitystarveluvun (Ilmatieteen laitos, 2025b) suhteella.

Lämmityskustannusten muutos laskettiin kertomalla lämmitysenergian tarpeen muutos kaukolämmön yksikköhinnalla 82,99 €/MWh (Lappeenrannan Energia, 2025b). Tulokset on esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3. Kohdekohtaiset vaikutukset kaukolämmön kysyntäjoudesta

	Normitettu lämmitysenergiankulutus [MWh]			Muutos läm- mön tarpeessa [MWh]	Muutos läm- mön tarpeessa [%]	Muutos läm- mityslaskussa [€]
	11/22–3/23	11/23–3/24	11/24–3/25			
Kohde 1	67,4	73,4	58,8	-10,6	-15,4 %	-881,5 €
Kohde 2	147,2	148,6	154,8	6,9	4,6 %	569,1 €
Kohde 3	216,8	208,6	193,6	-19,1	-9,2 %	-1 584,3 €
Kohde 4	40,2	44,9	42,1	-0,4	-0,9 %	-34,7 €
Kohde 5	242,4	234,9	219,9	-18,7	-8,4 %	-1 552,2 €
Kohde 6	125,6	136,0	132,3	1,5	1,3 %	121,1 €
Kohde 7	125,4	141,1	125,7	-7,6	-5,6 %	-629,4 €
Kohde 8	Jätetään tarkastelun ulkopuolelle					
Kohde 9	201,0	209,6	200,7	-4,6	-2,3 %	-380,8 €

Yksi tarkastelluista kohteista jätettiin analyysistä pois, sillä sen tulokset poikkesivat merkittävästi muista kohteista. Näin ollen sen ei katsottu edustavan luotettavasti kysyntäjoustopuolteen kiinteistökohtaisia vaikutuksia, eikä se siksi sisälly lopulliseen tarkasteluun.

Kun tarkasteluun jäi kahdeksan kohdetta, voidaan neljässä kohteessa havaita selkeä kaukolämpöjouston positiivinen vaikutus myös asiakkaalle – lämmön tarve sekä lämmityslasku pienenee huomattavasti. Kahden kohteen osalta laskennallinen muutos lämmön tarpeessa sekä lämmityskustannuksissa näyttää tarkastelujaksolla negatiivisena, ja kahdella kohteella tulokset ovat vain hieman positiivisia. Tämä ei kuitenkaan anna kokonaiskuvaa kysyntäjoustopuolteen vaikutuksista kyseisissä kohteissa – analyysi on tehty kuukausitasolla, ja

kaikissa neljässä kohteessa havaittiin selkeitä positiivisia vaikutuksia helmi-maaliskuun aikana. Positiiviset vaikutukset siis ajoittuvat ajanjaksoon, jolloin kysyntäjoustop ohjaustoimia optimoitiin. Koska lämmityskauden kylmimmät ja siten myös energiankulutuksen kannalta raskaimmat kuukaudet ajoittuvat joulukuusta helmikuuhun, näkyvät näiden kuukausien vaikutukset korostuneina kokonaislaskennassa. Tästä syystä kysyntäjoustop hyötyjä ei saatu tarkastelujakson kokonaisvertailussa esiin, mutta positiivisia tuloksia saatiin, ja niiden odotetaan näkyvän selvemmin seuraavan lämmityskauden 2025–2026 aikana, kun optimointitoimenpiteet saadaan täysimääräisesti käyttöön.

4.2.4 Vaikutukset tuottajalle

Tuottajalle aiheutuvia vaikutuksia arvioidaan tarkastelemalla kysyntäjoustop vaikutusta sähköntuotannon keskimääräiseen kustannukseen. Laskennassa keskityttiin alasjoustotilanteisiin, joissa lämmönkulutusta pyydettiin vähentämään. Näillä hetkillä toteutunut joustoteho kerrottiin kyseisen ajanhetken sähköntuotannon spot-hinnalla. Näin saatiin arvio joustop hetkellisestä kustannusvaikutuksesta tuottajalle.

Laskennassa käytettiin sähkön spot-hintaa, sillä sähkön spot-hinta heijastaa markkinoiden hetkellistä hintatasoa ja toimii näin luotettavana mittarina tuotannon taloudelliselle arvolle. Sähkön spot-hinta toimii tässä yhteydessä taloudellisena mittarina kyseisen ajanhetken markkina-arvolle, sillä se kuvastaa sitä hintatasoa, jolla sähköstä – ja siten myös yhteistuotannossa (CHP) syntyvästä tuotannosta – ollaan valmiita maksamaan markkinoilla. Kun lämpökuormaa voidaan kysyntäjoustopilla vähentää erityisesti korkeiden hintojen aikana, tuottajalla on mahdollisuus pienentää tuotantokustannuksia tai vaihtoehtoisesti ohjata tuotantoa taloudellisesti edullisempiin hetkiin. Tällöin syntyvä taloudellinen hyöty voidaan arvioida spot-hinnan perusteella.

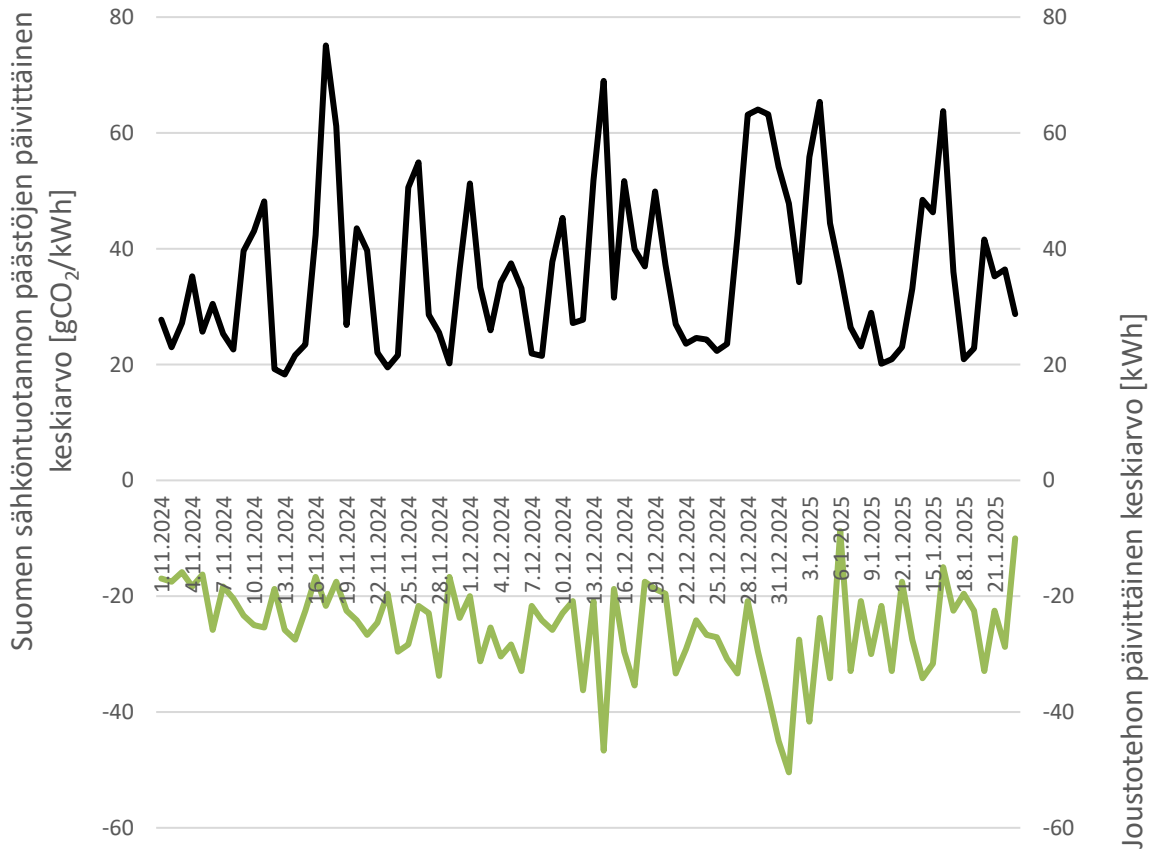
Koko tarkastelujakson ajalta saadut kustannusvaikutukset summattiin ja lopputulos skaalattiin vastaamaan koko verkoston laajuutta. Tämä mahdollisti kysyntäjoustop tuottajavaikutusten tarkastelun verkostotason mittakaavassa. Skaalattuna vaikutukset tuottajalle olisivat 1,2 €/MWh.

Lisäksi tarkasteltiin kysyntäjoustop vaikutusta sähköntuotannon hiilidioksidipäästöihin. Vaikutus laskettiin alasjoustotunneilla tuntikohtaisen datan perusteella hyödyntäen

verkoston lämmöntarvetta, toteutunutta alasjoustotehoa sekä Fingridin julkaisemaa Suomen sähköntuotannon tuntikohtaista päästöintensiteetin keskiarvoa (Fingrid, 2025b). Jokaiselta tunnilta laskettiin hiilidioksidipäästöt kertomalla joustoteho kyseisen tunnin päästöintensiteetillä. Tulokset summattiin koko tarkastelujakson ajalta.

Koska tarkasteltava kysyntäjousto kohdistui kaukolämpöverkkoon, jossa lämpöä tuotetaan osittain sähköä ja lämpöä samanaikaisesti tuottavissa yhteistuotantolaitoksissa (CHP), arvioitiin, että vain osa sähköntuotannon päästöistä liittyy tähän kulutukseen. CHP:n osuudeksi sähköntuotannosta arvioitiin 25 %.

Tarkastelujakson kokonaispäästövähennykseksi saatiin näin ollen noin 473 kg CO₂, mikä vastaa sitä määrää hiilidioksidipäästöjä, joka olisi syntynyt ilman joustotoimia. Kun vaikutukset skaalataan koko kaukolämpöverkkoon, saatiin laskennalliseksi vaikutukseksi -0,23 g CO₂/kWh, mikä vastaa 0,64 % vähennystä tuotannon keskimääräisiin päästöihin. Pienehkö prosentuaalinen vähennys selittyy muun muassa Suomen sähköntuotannon yleisesti alhaisella päästöprofiililla. Laajamittaisessa käytössä kysyntäjousto voi kuitenkin tuottaa merkittäviä päästövähennyksiä erityisesti ohjautuessaan korkean päästöintensiteetin tuntien ajankohtiin. Kuvassa 20 esitetään alasjoustopyyntien ja sähköntuotannon päästöintensiteetin samanaikaisuutta tarkastelujakson aikana. Kuvasta on havaittavissa, että osassa tilanteista ajoitukset ovat osuneet ajallisesti yhteen.



Kuva 20. Joustotehon ja sähköntuotannon päästöintensiteetin ajoittuminen päiväkohtaisesti tarkastelujakson aikana

4.3 Vertailu hankkeen tavoitteisiin

Hankkeen päätavoitteena oli parantaa kiinteistöjen energiatehokkuutta ja vähentää niistä aiheutuvia hiilidioksidipäästöjä. Konkreettisina tavoitteina asetettiin lämmönkäytön optimointi siten, että energiankulutus vähenisi 5–7 prosenttia ilman vaikutuksia asumismukavuuteen, hiilidioksidipäästöjen vähentäminen vähintään viidellä prosentilla sekä fossiilisten polttoaineiden käytön vähentäminen tasaamalla kulutushuippuja. Erityisesti kulutushuippujen hallinnalla pyrittiin vaikuttamaan energiantuotannon ympäristökuormitukseen, joka kasvaa usein silloin, kun energian tarve on suurimmillaan ja tuotannossa joudutaan turvautumaan päästöintensiivisempiin tuotantomuotoihin.

Kaikki asetetut tavoitteet saavutettiin hankkeen aikana. Tutkimuksessa mukana olleiden kiinteistöjen energiankulutus väheni keskimäärin 7,1 prosenttia, mikä ylittää alkuperäisen tavoitteen. Tämä kulutusvähennys näkyi myös taloudellisina säästöinä:

lämmityskustannuksissa saavutettiin keskimäärin noin 950 euron säästö per kohde tarkastelujaksolla. On myös merkittävää, että kysyntäjousto perustuvissa ratkaisuissa ei havaittu vaikutuksia käyttäjien asumismukavuuteen. Tämä johtuu siitä, että kysyntäjousto ei tarkoita kulutuksen vähentämistä, vaan sen siirtämistä ajankohtiin, jolloin energia on edullisempaa ja ympäristövaikutuksiltaan vähäisempää.

Hiilidioksidipäästöjen osalta saavutettiin samansuuntainen tulos. Koska päästöjen määrä on suoraan sidoksissa energiankulutukseen ja käytettyihin energianlähteisiin, voidaan kaukolämmön päästöjen arvioida vähentyneen samassa suhteessa kuin kulutus, eli keskimäärin 7,1 prosenttia. Näin ollen asetettu viiden prosentin päästövähennystavoite ylitettiin selvästi.

Myös fossiilisten polttoaineiden käyttöä saatiin vähennettyä kulutushuippujen tasaamisen avulla. Kulutushuippujen osuus kokonaiskulutuksesta pieneni 8,3 prosenttia, mikä tarkoittaa, että erityisesti fossiilisia polttoaineita käyttävien tuotantolaitosten käyttöä onnistuttiin vähentämään tehokkaasti. Tämä tulos osoittaa, että kulutuksen ajoittamisella ja älykkäällä lämmönkäytön ohjauksella voidaan saavuttaa merkittäviä ympäristöhyötyjä ilman, että asumisen laatu heikkenee.

Kun edellä mainitut tavoitteet toteutuvat yksittäisissä kohteissa, luovat ne pohjan myös laajemmalle, koko rakennuskantaa tai energiaverkkoa koskevalle vaikuttavuudelle. Hankkeessa on esitetty arvioita siitä, millaisia päästövähennyksiä ja energiatehokkuushyötyjä olisi mahdollista saavuttaa, mikäli saavutetut tulokset skaalattaisiin onnistuneesti laajemmin käyttöön. Näiden laskennallisten arvioiden mukaan esimerkiksi viiden prosentin vähennys lämmönkulutuksessa voisi tarkoittaa jopa 13,3 miljoonan tonnin vuosittaista hiilidioksidiekvivalenttien vähennystä. Vastaavasti yhden prosentin tehostuminen kaukolämmön jakeluhäviöissä voisi vastata noin 4 miljoonan tonnin päästövähennystä vuodessa. Lisäksi 700 MWh:n huipputehon polttoaineoptimointi voisi tuottaa vuosittain 135 tonnia CO₂-ekvivalenttia pienemmät päästöt. Nämä luvut havainnollistavat sitä potentiaalia, joka kulutuksen hallinnalla on koko energiajärjestelmän ja yhteiskunnan tasolla. Vaikka kyse on laskennallisista vaikutuksista, antavat ne konkreettisen kuvan siitä, miten yksittäiset toimenpiteet voivat skaalautua merkittäviksi ilmastotoimiksi.

5 Kysyntäjoustojen vaikutukset ja johtopäätökset

Tarkastelun perusteella kysyntäjousto, erityisesti alajouston muodossa, tarjoaa merkittäviä mahdollisuuksia kaukolämpöverkon optimointiin, energiatehokkuuden parantamiseen sekä päästöjen vähentämiseen. Alajouston hyödyntäminen tilanteissa, joissa kaukolämpöverkon menolämpötilaa nostetaan, osoittautui tehokkaaksi keinoksi vähentää verkoston lämpökuormitusta ja hillitä lämpötilan nousupaineita. Alajousto esiintyi yli puolessa niistä hetkistä, jolloin lämpötilaa nostettiin, ja skaalattuna energiansäästöksi saatiin yli 28 MWh. Tämä osoittaa, että tuotannon sijaan lämpötilan säätötarpeisiin voidaan vastata myös kulutuksen ohjauksella, mikä mahdollistaa kevyemmän lämmöntuotannon ja parantaa järjestelmän tehokkuutta. Keskimääräinen vaikutus menolämpötilan nousunopeuteen oli 0,36 °C tunnissa, ja vuositasolle skaalattuna alajoustojen arvioitu esiintymismäärä oli noin 2058 tuntia. Tämä tuo mukanaan myös pienen, mutta mitattavissa olevan vähennyksen kaukolämpöputkien lämpöhäviöissä (0,035 %), mikä tukee joustomekanismien integrointia osaksi lämmöntuotannon ohjausta.

Alajousto osoittautui myös merkittäväksi keinoksi fossiilisten polttoaineiden, erityisesti maakaasun, käytön vähentämisessä. Kolmen kuukauden tarkastelujaksolla maakaasua onnistuttiin korvaamaan uusiutuvilla energialähteillä 4,6 MWh:n verran, ja kun vaikutus skaalattiin koko lämmityskaudelle ja potentiaalisille kiinteistöille, saavutettiin jopa 850 MWh:n vähennys, mikä vastaa noin 340 tonnin CO₂-ekvivalenttipäästövähennystä vuositasolla. Alajousto auttoi vähentämään fossiilisilla polttoaineilla tuotettuja kysyntäpiikkejä 8,3 prosentilla, mikä korostaa sen merkitystä erityisesti tilanteissa, joissa uusiutuvat energialähteet voivat kattaa energiantarpeen. Näin ollen kulutusjousto tukee paitsi energian käytön tehostamista ja verkon kuormituksen tasaamista, myös fossiilisen tuotannon välttämistä – ja sitä kautta vihreää siirtymää.

Myös asiakkaiden näkökulmasta kysyntäjousto osoitti potentiaalinsa. Puolessa tarkastelluista kohteista saavutettiin merkittäviä säästöjä niin energian kulutuksessa kuin kustannuksissakin, ja muilla kohteilla vaikutukset näkyivät erityisesti lämmityskauden lopussa, kun ohjausjärjestelmä oli optimoitu. Tulevaisuudessa, kun järjestelmät toimivat läpi koko kauden, vaikutusten ennakoidaan kasvavan. Joustotoimenpiteet vähensivät hetkittäistä

lämmöntarvetta ilman negatiivista vaikutusta asumismukavuuteen, mikä tekee niistä houkuttelevan vaihtoehdon myös laajempaan käyttöönottoon.

Tuottajan näkökulmasta kysyntäjousto tarjoaa mahdollisuuden optimoida tuotantoa taloudellisesti edullisempiin ajankohtiin tai vähentää tuotantotarvetta kokonaan. Sähkön korkeiden hintojen aikaan toteutetut alajoustopot toivat laskennallisesti $-1,2$ €/MWh suuruisen kustannushyödyn. Lisäksi tarkasteltiin jouston vaikutuksia sähköntuotannon päästöihin. Yhteistuotannon erityisluonne huomioiden arvioitiin, että vain osa päästöistä liittyy joustotilanteisiin, mutta saavutettu 473 kg CO₂:n päästövähennys tarkastelujaksolla on silti merkittävä. Skaalattuna koko verkostolle tämä tarkoittaa $0,23$ g CO₂/kWh vähennystä, eli $0,64$ prosentin laskua tuotannon keskimääräisiin päästöihin. Vaikka prosentuaalinen vähennys on pieni, se kohdistuu pääosin korkean päästöintensiteetin hetkiin, jolloin vaikutus ympäristöön on suurimmillaan.

Yhteenvedona voidaan todeta, että kysyntäjouston integrointi osaksi kaukolämpöverkon ohjausta tuottaa sekä teknisiä, taloudellisia että ympäristöllisiä hyötyjä. Kaukolämmön kysyntäjousto toimii monipuolisena ja kustannustehokkaana keinona verkoston lämpötilanhallinnassa, mahdollistaa uusiutuvien polttoaineiden hyödyntämisen yhä kattavammin, vähentää fossiilisia päästöjä ja tuo säästöjä sekä kuluttajille että tuottajille. Kysyntäjousto vahvistaa näin osaltaan kaukolämpöjärjestelmän kestävyyttä ja tukee energiajärjestelmän ilmastotavoitteita pitkällä aikavälillä.

Lähteet

Aalto-yliopisto. 2021. Maarintie 8:n kaukolämmön kysyntäjousto. Saatavilla: <https://www.aalto.fi/fi/kestava-kehitys/maarintie-8n-kaukolammon-kysyntajousto> [Viitattu 5.2.2025]

Energiamaailma. 2024. Kaukolämpö ja -jäähdytys. Saatavilla: <https://energiamaailma.fi/energiasta/energiantuotanto/kaukolampo-ja-jaahdytys/> [Viitattu 22.10.2024]

Energiateollisuus ry. 2023. Kaukolämpötilasto 2022. Saatavilla: https://energia.fi/wp-content/uploads/2022/11/Kaukolampotilasto_2022.pdf

Energiateollisuus ry. 2023b. Kaukolämmön toimitusvarmuus ja keskeytykset. Saatavilla: <https://energia.fi/tilastot/kaukolampotilastot/keskeytystilasto/>

Energiateollisuus ry. 2023c. Kaukolämpöasiakkaiden mitoituslämpötilan laskeminen. Saatavilla: https://energia.fi/wp-content/uploads/2023/08/Kaukolampoasiakkaiden_mitoituslampotilan_laskeminen_101013094-Loppuraportti_AFRY.pdf

Energiateollisuus ry. 2024. Energiavuosi 2023 Kaukolämpö. Saatavilla: https://energia.fi/wp-content/uploads/2024/01/Kaukolampovuosi-2023_ennakkograafit-1.pdf

Energiateollisuus ry. 2024b. Kaukolämpöverkot. Saatavilla: <https://energia.fi/energiatie-toa/energiaverkot/kaukolampoverkot/> [Viitattu 22.10.2024]

Energiateollisuus ry. 2024c. Kaukolämmön vuositilastot. Saatavilla: <https://energia.fi/tiedotteet/kaukolammon-vuositilastot-paastot-romahtivat-kaukolampo-tasoittaa-sahkon-hintavaihteluita-uusissa-kerrostaloissa-kaukolammon-suosio-kaantynyt-kasvuun/> [Viitattu 24.10.2024]

Energiateollisuus ry. 2024e. Puhdistuva kaukolämpö. Saatavilla: <https://energia.fi/energia-politiikka/vahahiilisyiden-tiekartta/puhdistuva-energia/puhdistuva-kaukolampo/> [Viitattu 3.10.2024]

Energiateollisuus ry. 2025a. Kaukolämpövuosi 2024. Saatavilla: <https://energia.fi/tilastot/kaukolampotilasto/>

Energiateollisuus ry. 2025b. Tulevaisuuden asiakasratkaisut. Saatavilla: <https://energia.fi/energiatietoa/asiakkaat/kaukolammon-ja-jaahdytyksen-asiakkuus/tulevaisuuden-asiakasratkaisut/> [Viitattu 16.1.2025]

Euroopan parlamentti. 2025. Energiatehokkuus. Saatavilla: <https://www.europarl.europa.eu/factsheets/fi/sheet/69/energiatehokkuus> [Viitattu 29.1.2025]

Fingrid. 2025. Sähköjärjestelmän tila. Saatavilla: https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/sahkojarjestelman-tila/?utm_source=chatgpt.com [Viitattu 4.2.2025]

Fingrid. 2025b. Suomen sähköntuotannon päästökerroin – reaaliaikatieto. Saatavilla: <https://data.fingrid.fi/data?datasets=266> [Viitattu 2.4.2025]

GreenReality. 2025. BeyondEE – Integrated Digital Solutions for District Heating Optimisation & Empowering End-Users. Saatavilla: <https://www.greenreality.fi/hankkeet/beyond-integrated-digital-solutions-district-heating-optimisation-empowering-end-users> [Viitattu 24.1.2025]

Guelpa, E., Verda, V. 2021. Demand response and other demand side management techniques for district heating. Saatavilla: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544220325470>

Helen Oy. 2024. Kaukolämpölaitteet. Saatavilla: <https://www.helen.fi/kaukolampo/nykyisille-asiakkaille/kaukolampolaitteet> [Viitattu 22.10.2024]

Helen Oy. 2025. Katri Valan lämpöpumppulaitos. Saatavilla: <https://www.helen.fi/tietoa-meista/energia/voimalaitokset/katri-vala> [Viitattu 29.1.2025]

HögforsGST, 2023. Matalalämpöinen kaukolämpö – usein kysytyt kysymykset. Saatavilla: <https://hogforsgst.com/fi/blogi/matalalampoinen-kaukolampo-usein-kysytyt-kysymykset/> [Viitattu 3.10.2024]

Ilmatieteen laitos. 2025. Vuoden 2020 sää. Saatavilla: <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/vuosi-2020> [Viitattu 23.1.2025]

Ilmatieteen laitos. 2025b. Lämmitystarveluku eli astepäiväluku. Saatavilla: <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/lammitystarveluvut> [Viitattu 4.4.2025]

Karjalainen, Risto. 2025. Haastattelu. Sähkökattilan käyttö kaukolämmön tuotannossa.

Koivula, Rami. 2025. Haastattelu. Kaukolämpö- ja sähkömarkkinan yhteydet ja joustopotentiaali. Pelletin käyttö pienissä lämpölaitoksissa.

Koskelainen L., Saarela L., Sipilä, K. 2006. Kaukolämmön käsikirja. Energiateollisuus ry. 566 s. ISBN: 952-5615-08-1

Lappeenrannan Energia, 2023. Kaukolämpölaitteiden uusiminen kannattaa – hae ARAn avustusta. Saatavilla: <https://www.lappeenrannanenergia.fi/ajankohtaista/kaukolampolaitteiden-uusiminen-kannattaa-hae-aran-avustusta> [Viitattu 3.10.2024]

Lappeenrannan Energia. 2024. Vihreä ja vireä kaukolämpö – lappeenrantalaisten kotien luotettava lämmittäjä. Saatavilla: <https://www.lappeenrannanenergia.fi/tuotteet-ja-palvelut/vihrea-ja-virea-kaukolampo-lappeenrantalaisten-kotien-luotettava-lammittaja> [Viitattu 15.9.2024]

Lappeenrannan Energia. 2024b. Trimble-tietokanta.

Lappeenrannan Energia. 2024c. Lämpövoima sai yli 2,6 M€ tuen datakeskusten hukkalämpöä hyödyntävälle lämpöpumppulaitokselle. Saatavilla: <https://www.lappeenrannanenergia.fi/ajankohtaista/lampovoima-sai-yli-26-meu-tuen-datakeskuksen-hukkalampoa-hyodyntavalle> [Viitattu 28.1.2025]

Lappeenrannan Energia. 2025. Biolämpö - takuulla uusiutuvaa. Saatavilla: <https://www.lappeenrannanenergia.fi/biolampo-takuulla-uusiutuvaa> [Viitattu 15.1.2025]

Lappeenrannan Energia. 2025b. Kaukolämpöhinnasto. Saatavilla: <https://www.lappeenrannanenergia.fi/hinnastot-ja-ehdot/kaukolampohinnasto-0> [Viitattu 14.4.2025]

Lappeenrannan Lämpövoima. 2025. Kaukolämmön hankintatilasto 2024. Sisäinen tietolähde. Ei saatavilla julkisesti.

Paiho, S., Reda, F. 2016. Towards next generation district heating in Finland. VTT. DOI: 10.1016

Pöyry Management Consulting. 2017. Kaksisuuntaisen kaukolämmön liiketoimintamallit. Saatavilla: https://www.sitra.fi/wp/wp-content/uploads/2017/02/Kaksisuuntaisen_kaukolammon_liiketoimintamallit-2.pdf

Teknologian tutkimuskeskus VTT. 2022. Sektori-integraatio: kohti hiilineutraalia energiajärjestelmää. Saatavilla: <https://www.vttresearch.com/fi/syvenny-aiheeseen/opas-sektori-integraation-hyodyntamiseen>

Tilastokeskus. 2025. Polttoaineluokitus. Saatavilla: https://stat.fi/tup/khkinv/khkaasut_polttoaineluokitus.html [Viitattu 2.4.2025]

Työ- ja elinkeinoministeriö. 2022. Hiilineutraali Suomi 2035 – kansallinen ilmasto- ja energiastrategia. ISBN: 978-952-327-811-0

VALOR Partners Oy. 2015. Kaukolämmön kysyntäjousto. Saatavilla: https://energia.fi/wp-content/uploads/2023/08/Kaukolammon_kysyntajousto_loppuraportti_VALOR.pdf