



**ASUINKERROSTALOJEN MAALÄMPÖJÄRJESTELMIEN POTENTIAALI  
SÄHKÖN KYSYNTÄJOUSTOSSA**

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Energiatekniikan diplomityö

2023

Mika Isohookana

Tarkastajat: Dosentti, TkT Ahti Jaatinen-Värri

TkT Antti Uusitalo

## TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUT Energiajärjestelmät

Energiatekniikka

Mika Isohookana

### **Asuinkerrostalojen maalämpöjärjestelmien potentiaali sähkön kysyntäjoustopotentialissa**

Energiatekniikan diplomityö

2023

88 sivua, 29 kuvaa, 11 taulukkoa ja 1 liite

Tarkastajat: Dosentti, TkT Ahti Jaatinen-Värri ja TkT Antti Uusitalo

Avainsanat: Kysyntäjousto, sähkön reservimarkkinat, maalämpö, lämpöpumppu

Euroopassa tavoitellaan ilmastohiilineutraaliutta vuoteen 2050 mennessä. Tavoitteiden saavuttamiseksi energiantuotannossa lisätään uusiutuvien energialähteiden käyttöä ja rakennusten lämmitystä sähköistetään lämpöpumpputeknologialla. Osana muutoksia sähkön tuotannosta tulee vaikeammin ennustettavaa ja tuotannon sääriippuvaisuus lisääntyy. Samaan aikaan sähkön kysyntä kasvaa, kun asuinrakennuksien lämmöntuotantojärjestelmiä vaihdetaan lämpöpumpputeknologiaan. Muutoksien vuoksi sähköjärjestelmä tarvitsee sähkön käytön ja tehotasapainon hallintaan lisää joustokapasiteettia. Asuinkerrostalon maalämpöjärjestelmän kysyntäjoustopotentialin avulla lisätään joustokapasiteettia sähkömarkkinoille.

Diplomityön tavoite oli selvittää asuinkerrostalon maalämpöjärjestelmän kysyntäjoustopotentialia Suomessa sekä miten kysyntäjousto vaikuttaa asuinkerrostalon energiankulutukseen ja sisäolosuhteisiin. Vaikutuksia tutkittiin mallintamalla case-asuinkerrostalo simulointiohjelmaan, minkä avulla simuloitiin kysyntäjoustopotentialia ja verrattiin tuloksia tilanteeseen ilman kysyntäjoustopotentialia.

Asuinkerrostalojen maalämpöjärjestelmät soveltuvat kysyntäjoustopotentialin toteuttamiseen, kun lämmöntuotannon ohjaustapaa muutetaan perinteisestä ohjaustavasta. Kysyntäjoustopotentialilla ei ole vaikutusta asuintilojen sisäolosuhteisiin, kun reunaehdot kysyntäjoustopotentialin toteutukselle selvitetään etukäteen. Lämmitystehoa leikkaamalla ja siirtämällä toiseen ajankohtaan kysyntäjousto ei lisää rakennuksen energian kulutusta. Yhdistämällä useampi asuinkerrostalon maalämpöjärjestelmä yhdeksi isommaksi kokonaisuudeksi saadaan sähkömarkkinoille huomattavasti lisää joustopotentialia.

## ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

School of Energy Systems

Energy Technology

Mika Isohookana

### **The potential of residential apartment building's ground source heat pump systems in electricity demand response**

Master's thesis

2023

88 pages, 29 figures, 11 tables and 1 appendice

Examiners: Dosent, TkT Ahti Jaatinen-Värri, TkT Antti Uusitalo

Keywords: Demand response, power balance management, ground source heat pump, heat pump

Europe is aiming for climate carbon neutrality by 2050. As part of this goal, the EU is planning on increasing the use of renewable energy sources in energy production and the heating of residential buildings is electrified with heat pump technology. As a result, forecasting electricity production becomes more difficult via increased dependence on weather factors. Simultaneously, the demand for electricity will increase as heat production systems of residential buildings switch to ground source heat pump (GSHP) technology. Due to the changes, electricity systems need more flexibility in their capacity to manage electricity usage and power balance. The demand response (DR) of residential building's GSHP systems increases capacity flexibility for electricity markets.

The goal of the Master's Thesis was to find out the DR potential of a residential apartment building's GSHP system in Finland and how DR affects the energy consumption and indoor conditions of apartment buildings. With the help of the simulation program, a case residential apartment building was modeled in which the effect of DR was simulated and compared to results without DR.

GSHP systems are suitable for DR in residential apartment buildings when the heat production control method is changed from a traditional one. DR has no effect on indoor temperature of residential apartment buildings if the preconditions for the implementation of DR are clarified in advance. By decreasing the heating power and redistributing it over a more optimized period of time (load shedding), DR does not increase the energy consumption of a residential building. There is considerable potential for increasing capacity flexibility in electricity markets e.g., by combining several residential apartment buildings GSHP systems with DR into larger entities.

## SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

### Roomalaiset

Q	lämpömäärä	[J]
W	työ	[J]

### Kreikkalaiset

$\eta$	hyötysuhde	[%]
$\varphi$	lämpöteho	[W]

### Yksiköt

Hz	hertsi
W	watti
kW	kilowatti
kWh	kilowattitunti
MW	megawatti
MWh	megawattitunti
pmy/l	pesäkettä muodostavaa yksikköä per litra

### Alaindeksit

in	sisäänvirtaus
out	ulosvirtaus

## Lyhenteet

aFFR	Automaattinen taajuuden palautusreservi
DR	Demand response
COP	Coefficient of Performance
EU	Euroopan Unioni
FCR	Taajuusohjattu käyttö- ja häiriöreservi
FFR	Nopea taajuusreservi
GSHP	Ground source heat pump
ON/OFF	Päälle/pois
YM	Ympäristöministeriö

## Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Symboli- ja lyhenneluettelo

1	Johdanto.....	8
1.1	Työn tausta .....	8
1.2	Työn tavoitteet .....	10
1.3	Rajaukset.....	12
1.4	Työn rakenne.....	13
2	Maalämpö.....	14
2.1	Maalämpöjärjestelmä .....	15
2.2	Maalämpöpumppu.....	16
2.2.1	Maalämpöpumpun hyötysuhde.....	19
2.2.2	Maalämpöpumpun mitoitus .....	20
2.2.3	Maalämpöpumpun ohjaus ja tehonsäätö.....	21
3	Asuinkerrostalojen energiakulutus ja sisäilmasto-olosuhteet.....	23
3.1	Asuinkerrostalon sisäilmasto-olosuhdevaatimukset ja käyttöveden vaatimukset.....	24
3.1.1	Lämpöolosuhteet.....	24
3.1.2	Lämmin käyttövesi .....	26
3.2	Rakennuksen energiantarve .....	27
3.2.1	Lämmitysenergian- ja tehon tarve .....	28
4	Sähköjärjestelmät- ja markkinat Suomessa.....	32
4.1	Sähkömarkkinalaki.....	33
4.2	Sähkömarkkinat.....	34
4.2.1	Varttitase .....	36
4.3	Sähköjärjestelmän tehtasapaino ja reservimarkkinat .....	37
4.3.1	Taajuusohjattu käyttö- ja häiriöreservi (FCR).....	38
4.3.2	Automaattinen taajuuden palautusreservi (aFRR).....	39
4.3.3	Nopea taajuusreservi (FFR).....	39
4.3.4	Sähkön tuotantorakenteen muutoksien vaikutus reservien kysyntään.....	39

5	Kysyntäjousto .....	42
5.1	Kysyntäpuolen joustavuus .....	42
5.1.1	Lämmitysjärjestelmän joustavuus.....	44
5.1.2	Rakennus lämpövarastona .....	45
5.2	Kysyntäpuolen jouston edellytykset .....	46
5.2.1	Aggregaattori .....	46
5.3	Tutkimukset lämpöpumppujen kysyntäjoudesta.....	46
5.3.1	Lämpöpumppujen ohjaustapojen muutos .....	49
6	Asuinkerrostalon lämmitysjärjestelmän kysyntäjoustoposimuloinnit.....	51
6.1	Simulointien kulku .....	52
6.1.1	Simulointiohjelmisto.....	53
6.1.2	Case-asuinkerrostalon mallintaminen.....	54
6.2	Kysyntäjoustopotentiaali.....	59
6.2.1	Lattialämmitysrakennus.....	59
6.2.2	Patterilämmitysrakennus.....	61
6.3	Vaikutukset sisäolosuhteisiin .....	63
6.4	Vaikutukset lämmitystehtävään ja energiakulutukseen.....	66
6.4.1	Lattialämmitysrakennus.....	66
6.4.2	Patterilämmitysrakennus.....	70
7	Johtopäätökset .....	74
8	Yhteenveto.....	81
	Lähteet .....	83

## Liitteet

Liite 1. Case-asuinkerrostalon rakenteet, U-arvot ja käyttöajat

# 1 Johdanto

Euroopassa tapahtuu yhtä aikaa suuria rakenteellisia muutoksia sekä energian tuotantojärjestelmissä että rakennusten lämmitysjärjestelmissä. Eurooppa pyrkii eroon fossiilisista, etenkin maakaasun polttoon perustuvista sähköenergian tuotantojärjestelmistä sekä rakennusten lämmitysjärjestelmistä. Nykyistä sähköenergian tuotantoa korvataan uusiutuvalla, sääriippuvaisella energian tuotannolla, kuten aurinko- ja tuulienergiatuotannolla, mikä aiheuttaa kasvavaa joustotarvetta sähköverkkoon- ja markkinoille. Samaan aikaan rakennuksien maakaasulla toimivia lämmitysjärjestelmiä korvataan lämpöpumpputekniikkaan perustuvilla lämmitysjärjestelmillä, mikä lisää sähkön kysyntää ja vahvistaa lämmitys- ja sähköjärjestelmien välistä yhteyttä. Fossiilisen energian polttoon perustuva sähköenergian tuotanto on hyvän säätökykynsä vuoksi tähän saakka pystynyt joustamaan tuotantoa sähkön kulutuksen mukaan, mutta tulevaisuudessa sähköenergian tuotantorakenteen muuttuessa tarvitaan joustoa myös sähkön kuluttajien puolelta. Yhtä aikaa tapahtuvat rakenteelliset muutokset vaikuttavat sekä sähkön tuotannon että kysynnän tasapainoon, mikä lisää jouston tarvetta sähkön kulutuspiiristä ja tätä joustoa kutsutaan kysyntäjoustoksi. Tässä työssä tutkitaan kuluttajan puolelta tapahtuvaa kysyntäjoustoa asuinkerrostalon maalämpöjärjestelmän avulla.

## 1.1 Työn tausta

Euroopan unionissa on sitouduttu tavoitteeseen saavuttaa ilmastohiilineutraalius vuoteen 2050 mennessä. Ilmastohiilineutraaliuden tavoitteluun on asetettu välitavoitteena vähentää ilmastopäästöjen määrää 55 % vuoteen 2030 mennessä verrattuna vuoden 1990 päästöihin. Euroopan komissio on esittänyt Fit for 55 -ilmastopakettia välitavoitteiden saavuttamiseksi, jonka avulla kiritään ilmastotoimia teollisuuden, yhteiskunnan ja talouden aloilla. Fit for 55 -paketti sisältää 12 esitystä, jotka vaikuttavat mm. polttoaineisiin, rakennusten energiatehokkuuteen ja energiaan. (Euroopan Unionin neuvosto, 2022.)

Euroopan komissio on ehdottanut uusiutuvan energian direktiivin (RED II) tarkistamista osana Fit for 55 -ilmastopakettia. Direktiivissä on säädetty sitovasta unionin yleistavoitteesta, jonka mukaan uusiutuvista lähteistä peräisin olevan energian osuuden on



oltava vähintään 32 % energian kokonaisloppukulutuksesta vuoteen 2030 mennessä. Jokaisen jäsenvaltion tulee asettaa kansalliset panoksensa yleistavoitteen saavuttamiseksi ja mm. Suomi on ilmoittanut tavoitteeksi nostaa uusiutuvan energia osuus vähintään 51 % energian kokonaisloppukulutuksesta vuoteen 2030 mennessä. Suomen pitkän aikavälin ennusteessa odotetaan kasvua erityisesti tuulivoimassa ja lämpöpumppujen käytössä sekä vuoden 2035 jälkeen myös aurinkoenergian käytössä. (Motiva, 2022a.)

Euroopan parlamentti on kevään 2023 aikana hyväksynyt kantansa lakiehdotukseen, jolla muutetaan rakennusten energiatehokkuusdirektiiviä. Energiatehokkuusdirektiivin muutoksen taustalla on tavoite vähentää rakennusten energiankulutusta ja kasvihuonepäästöjä sekä lisätä näitä edistäviä peruskorjauksia että energiatehottomien rakennusten peruskorjausastetta. Lakiehdotuksen sisällön mukaan kaikkien uusien rakennusten tulee olla päästöttämiä vuodesta 2028 alkaen ja julkisten rakennuksien jo vuoteen 2026 mennessä. Uusien ja olemassa olevien asuinrakennusten on saavutettava vähintään energiatehokkuusluokka E vuoteen 2030 mennessä. Peruskorjattavat asuinrakennukset tulisi varustaa aurinkoenergiatekniikalla vuoteen 2032 mennessä ja uudet asuinrakennukset tulisi varustaa aurinkoenergiatekniikalla vuoteen 2028 mennessä. (Euroopan parlamentti, 2023.)

Asumisen osuus energian kokonaisloppukäytöstä oli Euroopassa vuonna 2020 noin 25 % ja Suomessa noin 18 %. Asumisen sektorin valinnoilla on siis merkittävä rooli siinä, onnistutaanko asetetut tavoitteet uusiutuvan energian loppukäytön suhteen saavuttamaan. Suomen lämpöpumppuyhdistyksen mukaan Suomessa on noin 1,4 miljoonaa lämpöpumppua vuonna 2022. Lämpöpumppuja myytiin Suomessa vuonna 2022 yhteensä lähes 200 000 kappaletta, mikä tarkoittaa 50 % kasvua vuoteen 2021 verrattuna. Lämmityksen sähköistämistä vauhdittaa mm. EU:n Fit for 55 -paketin tavoite sähköistää Euroopan lämmitysjärjestelmät vuoteen 2030 mennessä, mikä tarkoittaa noin 50-60 miljoonaa uutta lämpöpumppua eli nykyisen noin 20 miljoonan lämpöpumppukannan kolminkertaistamista. Kansainvälisen energijärjestön IEA:n arvion mukaan maailmassa on vuonna 2050 noin 1,8 miljardia lämpöpumppua. (International Energy Agency, 2023.) (Suomen Lämpöpumppuyhdistys SULPU ry, 2023.)

Suomen sähkönsiirron kantaverkon ylläpitäjä Fingrid arvioi kantaverkon kehittämissuunnitelmassa lämmityksen sähköistymisen yhtenä kehitysnäkymänä ja sen vaikutuksia sähköverkkoon. Fingrid arvioi sähkön lämmityskulutuksen kasvavan Suomessa

noin 6 TWh vuosina 2019-2030 lämpöpumppujen määrän kasvaessa kotitalouskohteissa sekä kaukolämmön tuotannossa. Kaukolämmön tuotannon ennustetaan höydyntävän tulevaisuudessa yhä enemmän lämpöpumppuja, jolloin sähkön ja lämmön yhteistuotantokapasiteetti pienenee eli sähkön tuotanto samanaikaisesti supistuu, mutta kulutus kasvaa. Sähkön tuotannon kehitysnäkymissä Fingrid arvioi, että Suomen tuulivoimakapasiteetti kasvaa voimakkaasti noin 1000 MW vuodessa 2020-luvun aikana, mikä tarkoittaa sitä, että vuoden 2022 kapasiteetti 4000 MW tulee yli kolminkertaistumaan vuoteen 2030 mennessä noin 14 000 MW:iin. Tuulivoiman kasvaessa sähkön tuotanto muuttuu yhä enemmän sääriippuvaiseksi ja sähkön tuotannon säätökyky heikkenee. Fingridin kantaverkon kehittämissuunnitelman arviossa kotitalous- ja palvelusektorit kattavat lähes kaksi kolmaosaa sähkön huipputehontarpeesta eli kotitalous- ja palvelusektorien sähkökuormien älykkäässä ohjauksessa on siis merkittäviä mahdollisuuksia kysyntäjousto. Suomen hallitus on myös ottanut kantaa kasvavaan jouston tarpeeseen esityksessään sähkömarkkinalain muuttamiseksi. Esityksessä on mm. annettu tavoitteeksi esittää toimia älykkästä sähköjärjestelmästä, joka mahdollistaa asiakkaiden mahdollisuuksia osallistua aktiivisesti markkinoille sähkön toimitusvarmuuden ylläpitämiseksi. Lisäksi sähköntoimittajasta itsenäisien aggregaattorien markkinoille pääsyä sähköjärjestelmän joustoresurssien saatavuuden lisäämiseksi halutaan säädellä uudestaan. (Fingrid, 2022a.) (Suomen Eduskunta, 2022.)

Sähkömarkkinoilta vaaditaan tulevaisuudessa rakenteellisia muutoksia, jotta kasvavaan sähkön kysyntään pystytään vastaamaan samalla kun sähkön tuotantorakenne muuttuu enemmän sääriippuvaiseksi ja samalla säätökykyistä polttoon perustuvaa sähkön tuotantoa poistuu markkinoilta. Lämmitys ja sähköjärjestelmien välinen yhteys vahvistuu koko ajan mikä tuo lämmitysjärjestelmät mukaan sähkömarkkinoille. Kehittämällä ja mahdollistamalla rakennusten osallistuminen kysyntäjouston avulla osaksi sähkömarkkinoita saadaan merkittävää joustopotentialia sähkömarkkinoille.

## 1.2 Työn tavoitteet

Työssä tutkitaan asuinkerrostalojen maalämpöjärjestelmien sähkön kysyntäjouston potentiaalia ja miten kysyntäjousto voidaan toteuttaa heikentämättä rakennuksen sisäilmasto-olosuhteita. Tavoitteena on selvittää soveltuuko asuinkerrostalojen

maalämpöjärjestelmä kysyntäjoukseen, reunaehdot kysyntäjoukseen toteuttamiseen sekä selvittää mitä teknisiä vaatimuksia kysyntäjoukseen toteuttaminen asettaa maalämpöjärjestelmiin.

Tässä diplomityössä pyritään selvittämään vastaukset seuraaviin kysymyksiin:

- Miten asuinkerrostalojen maalämpöjärjestelmät soveltuvat sähkön kysyntäjoukseen ja mikä on kysyntäjoukseen potentiaali?
- Millaisia vaikutuksia kysyntäjoukseen on asuintilojen sisäilmasto-olosuhteisiin?
- Vaikuttaako kysyntäjoukseen rakennuksen energian kulutukseen?

Työn alkuosassa aihetta lähestytään kirjallisuustiedon perusteella. Kirjallisuustiedon avulla etsitään tärkeimmät tekijät kysyntäjoukseen näkökulmasta seuraaviin kysymyksiin:

- Miten sähkön käyttö liittyy maalämpöenergiaan
- Mitkä tekijät vaikuttavat asuinkerrostalojen energiankulutukseen ja lämmitystehon tarpeeseen
- Mitä reunaehdot asuinrakennusten sisäilmasto-olosuhdevaatimukset asettavat kysyntäjoukseen
- Miten sähkömarkkinat toimivat Suomessa
- Millaisia eri toteutusmalleja sekä markkinapaikkoja sähkön kysyntäjoukseen löytyy

Teoriaosuudessa keskitytään käymään teoriaa lävitse rajaamalla aiheita kysyntäjoukseen näkökulmasta tärkeimpiin ja oleellisimpiin kysymyksiin. Käsiteltävät teoriaosuudet pyritään taustoittamaan ja käsittelemään mahdollisimman tiiviisti, sillä teoriaosuuden aihealueet eivät itsessään ole tutkimuksen pääpainona, mutta niiden ymmärtäminen ja reunaehtojen selvittäminen on oleellista tutkimuksen kokonaisuuden eli kysyntäjoukseen näkökulmasta, koska kysyntäjoukseen vaikuttaa sähkön käytön lisäksi mm. sisäolosuhteisiin sekä kokonaisenergian kulutukseen ja koska yhteys lämmitys- ja sähköjärjestelmien välillä kasvaa koko ajan.

Näiden lähtökohtien perusteella työssä selvitetään simulointiohjelmaa hyödyntäen case-asuinkerrostalon lämmitysenergian tuntitasoinen kulutus vuoden ajanjaksolla, jonka avulla selvitetään maalämpöjärjestelmän sähkötehopotentiaalia kysyntäjoukseen näkökulmasta. Simulointiohjelman avulla selvitetään kysyntäjoukseen vaikutuksia sisäolosuhteisiin sekä energiankulutukseen. Simulointien tavoitteena on tutkia kuinka nopeasti sisäilmasto-

olosuhteet muuttuvat kysyntäjoustopotentialin aikana, miten kysyntäjoustopotentiali vaikuttaa energian kulutukseen sekä mikä on kysyntäjoustopotentialin potentiaali ja soveltuvuus eri markkinoille.

### 1.3 Rajaukset

Työssä keskitytään tutkimaan asuinkerrostalon maalämpöjärjestelmän kysyntäjoustopotentialia, koska sähköenergian käyttö maalämpöjärjestelmissä on huomattavan suuri verrattuna muihin asuinkerrostalojen lämmitysmuotoihin. Muut rakennustyytit, kuten toimitilat ja varastot sekä muut lämmitysmuodot rajataan työn ulkopuolelle, sillä kysyntäjoustopotentialia on aiemmissa tutkimuksissa tutkittu kaukolämmiteisissä rakennuksissa sekä muissa rakennustyypeissä. Asuinkerrostalojen kulutusprofiilit eroavat huomattavasti muista rakennustyypeistä, kuten toimitiloista tai varastoista ja sen vuoksi tutkimus rajataan käsittämään vain asuinkerrostaloja.

Työssä ei tutkita asuinkerrostalojen muiden sähkölaitteiden kysyntäjoustopotentialia, koska maalämpöjärjestelmä on sähköteholtaan huomattavasti suurempi kuin muut asuinkerrostalojen sähkölaitteet.

Lämpöpumppujen komponentit, kompressorityypit, kiertoaineet sekä muu lämpöpumppujen komponentteihin liittyvä syvempi tekninen tarkastelu rajataan työn ulkopuolelle. Sen lisäksi maalämmön keruupiirien tutkiminen rajataan työn ja kirjallisuusosion ulkopuolelle, koska tavoitteena on tutkia rakennuksen joustokykyä ja muutoksia rakennuksen olosuhteissa sekä energian kulutuksessa.

Case-asuinrakennuksen kysyntäjoustopotentialisimulaatioissa tutkitaan maalämpöjärjestelmän kysyntäjoustopotentialia pysäyttämällä lämmitys kysyntäjoustopotentialien ajoiksi. Tavoite on selvittää vaikutukset case-asuinkerrostalon energiankulutukseen sekä selvittää kuinka nopeasti sisäolosuhteet muuttuvat, jos lämmöntuotannon ohjaustapaa muutetaan niin, että lämmitystä ohjataan kysyntäjoustopotentialin näkökulmasta, eikä lämmitystarpeen näkökulmasta. Muut kysyntäjoustopotentialisimulaatio- ja strategiat rajataan tutkimuksen ulkopuolelle. Kysyntäjoustopotentialisimulaatioissa ei tutkita rakennuksen tai lisälämmönvaraajien lämmönvarauskykyä esilämmitystä hyödyntämällä.

#### 1.4 Työn rakenne

Kirjallisuuskatsauksessa taustoitetaan työn kannalta keskeisimmät tiedot asuinkerrostalojen sisäolosuhteiden vaatimuksista ja raja-arvoista sekä asuinkerrostalojen energiankulutuksesta. Näiden lisäksi kirjallisuuskatsauksessa taustoitetaan työn kannalta keskeisimmät tiedot sähkömarkkinoista ja tehoreserveistä sekä perehdytään kirjallisuuskatsauksen avulla kysyntäjousto. Kysyntäjouston vaikutuksia case-asuinkerrostalon sisäolosuhteisiin ja energiankulutukseen tutkitaan simuloimalla kysyntäjoustostrategiota mallinnettuun case-asuinkerrostaloon ja verrataan tuloksia tilanteeseen ilman kysyntäjousto.

## 2 Maalämpö

Energia- ja ilmastostrategian tavoitteiden mukaisesti uusiutuvan energian käyttöä pyritään lisäämään nykyisestä niin, että vuonna 2030 uusiutuvan energian osuus loppukulutuksesta on vähintään 51 prosenttia. Energian loppukulutuksella tarkoitetaan sähkön ja lämmön polttoaineiden, rakennusten lämmityksen polttoaineiden, liikennepolttoaineiden sekä teollisuuden polttoaineiden kulutusta. (Motiva, 2022b.) Energia- ja ilmastostrategian tavoitteiden saavuttamiseksi Suomen Valtioneuvosto on laatinut ”Hiilineutraali Suomi 2035 – kansallinen ilmasto- ja energiastrategia”- toimintaohjelman. Kesäkuussa 2022 Valtioneuvosto on toimittanut selonteon eduskunnalle kansalliseen ilmasto- ja energiastrategiaan liittyen ja strategian keskeisessä merkityksessä ovat mm. sähköistäminen sekä polttoon perustumattoman lämmöntuotannon edistäminen. (Ympäristöministeriö, 2022.)

Maalämmöllä on iso rooli tulevaisuden hiilineutraaliustavoitteissa sen polttoon perustumaton lämmöntuotantomuotonsa vuoksi. Esimerkiksi Helsingin kaupunki on sitoutunut kasvattamaan kaupungissa käytettävän maalämmön määrää hiilineutraaliustavoitteiden puitteissa. Helsingin tavoitteena on tyydyttää kaupungin lämmitystarpeesta 15 prosenttia maalämpöjärjestelmillä vuodesta 2030 alkaen. Maalämmön osuus Helsingin lämmitysenergiasta vuoden 2021 lopussa oli vain noin 1,8 prosenttia, mutta samalla maalämpökaivoja asennettiin kuitenkin 25 prosenttia enemmän kuin sitä aiempina vuonna. Kysyntä erityisesti taloyhtiöiden parissa on Helsingin kaupungin mukaan kasvanut. Edistääkseen ja tukeakseen energiakaivojen rakentamista Helsingin kaupunki on mm. poistanut käytöstä maalämmön rakennusvalvonnan lupamaksut. (Helsingin kaupunki, 2022.)

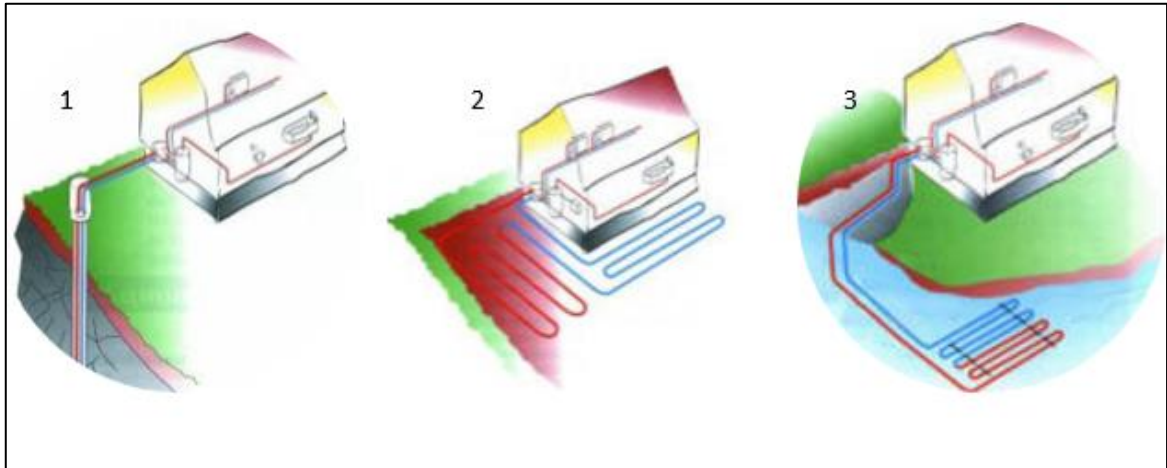
Tässä teoriaosuudessa kuvataan, miten sähkön käyttö liittyy maalämpöpumpun lämmöntuotantoon. Tavoite on selvittää, mistä maalämpöjärjestelmän sähkön kulutus muodostuu teoriatasolla sekä miten maalämpöpumppuja ohjataan, jotta maalämpöjärjestelmien sähkön käytön tarvetta osataan arvioida osana kysyntäjoukon suunnittelua. Aiheita käydään läpi niiltä osin kuin niiden tunteminen on tarpeellista kysyntäjoukon suunnittelussa. Näiden lisäksi teoriaosuuden tarkoituksena on taustoittaa

yksinkertaisesti ja lyhyesti, mitä maalämpö tarkoittaa sekä miten maalämpöjärjestelmä toimii.

## 2.1 Maalämpöjärjestelmä

Yksinkertaistettuna maalämpö on kallio- ja maaperän pintaosiin tai veteen varastoitunutta energiaa, josta pääosa on peräisin auringon säteilystä. Syvemmälle kallioperään varastoitunutta lämpöenergiaa kutsutaan geotermiseksi energiaksi, joka taas on pääosin peräisin radioaktiivisten aineiden hajoamisesta syntyvästä energiasta. Lämpöpumpputekniikan avulla tätä kallio- ja maaperään tai vesistöihin varastoitunutta lämpöenergiaa voidaan käyttää rakennusten lämmittämiseen ja jäähdyttämiseen ympäri vuotuisesti. (Juvonen ja Lapinlampi 2013, 4.)

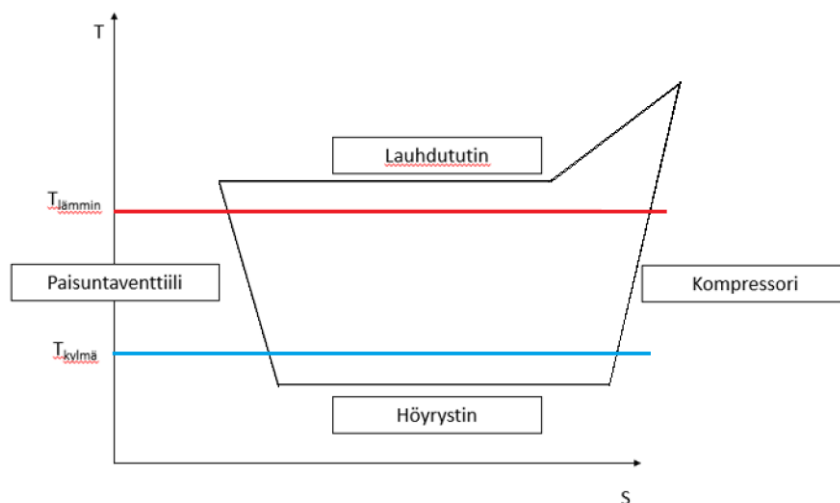
Maalämpöjärjestelmä koostuu lämpöpumpusta, keruupiiristä ja lämmityspiiristä. Maalämpöjärjestelmässä lämpöenergiaa otetaan talteen keruupiirin avulla joko vesistön pohjaan upotetusta putkistosta, kallioon poratuista lämpökaivoista tai maahan asennetuista vaakaputkistoista (kuva 1). Lämpöpumpulla tarkoitetaan yhteisnimitystä em. lämmönottotavoista, joissa keruupiirin energia siirretään yleensä sähkön avulla rakennusten käyttöön ja haluttuun lämpötilaan lämmityspiirin avulla. Maalämpö soveltuu parhaiten käytettäväksi matalan lämpötilan lämmönjakojärjestelmiin, kuten esimerkiksi vesikiertoisen lattialämmitysjärjestelmän lämmönlähteeksi, sillä lämpöpumppu toimii sitä paremmalla hyötysuhteella, mitä pienempi on keruupiirin ja lämmityspiirin välinen lämpötilaero. (Hakala ja Kaappola 2013, 230-231.) (Juvonen ja Lapinlampi 2013, 5-7.)



Kuva 1. Havainnekuvat maalämmön lämmönlähteistä: 1 kallioperään varastoitunut energia, 2 maaperän pintaosaan varastoitunut energia, 3 veteen varastoitunut energia (Gebwell 2022. mukailten).

## 2.2 Maalämpöpumppu

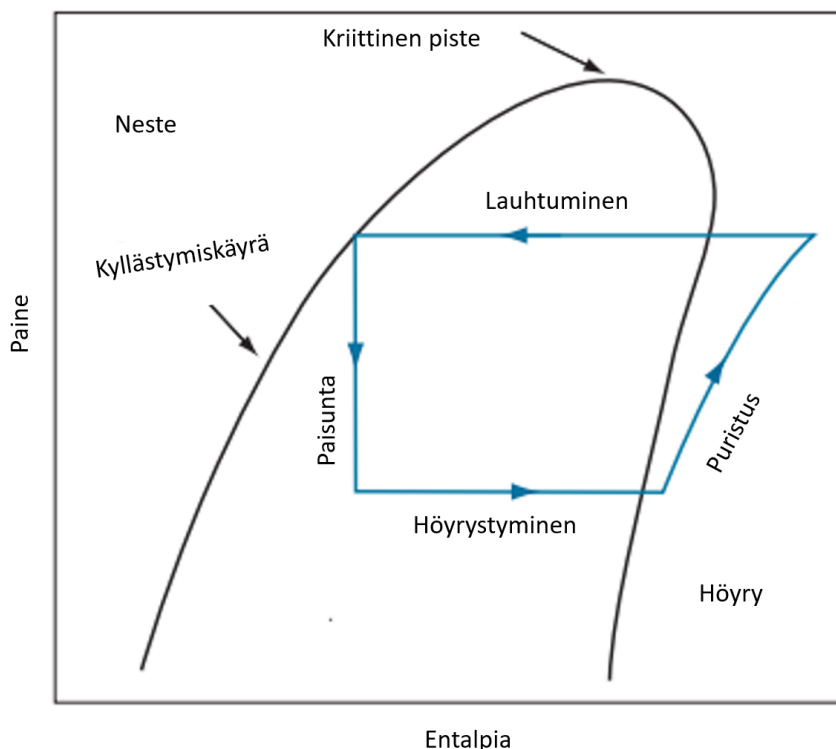
Maalämpöpumppu on laite, joka siirtää ulkoisen työn avulla lämpöenergiaa ottamalla lämpöä kylmästä tilasta ja luovuttamalla sen lämpimämpään tilaan (Chiasson, D 2016, 310). Lämpöpumpun toimintaperiaate on havainnollistettu yksinkertaisesti kuvassa 2, missä esitetään kylmäaineen lämpötilan  $T$  ja entropian  $S$  muutos kussakin eri lämpöpumpun kiertovaiheessa ja komponentissa (Grassi, W 2018, 5).



Kuva 2. Yksinkertaistettu lämpöpumpun toimintaperiaate (Grassi, W 2018, 5. mukailten)



Maalämpöpumpun toiminta perustuu koneistossa kiertävän kylmäaineen höyrystymiseen ja lauhtumiseen maalämpöpumpun eri komponenteissa. Maapiirissä lämmentynyt lämmönsiirtoneste kulkee lämpöpumpun höyrystimen kautta ja palaa takaisin maapiiriin. Höyrystimessä lämpöpumpun kylmäaine höyrystyy sitoen lämpöä maapiirissä lämmenneestä lämmönsiirtonesteestä kylmäaineeseen. Höyrystimeltä kylmäaine kulkee kompressorille, missä kylmäaine puristetaan kompressorilla sähköenergian avulla korkeampaan paineeseen, jolloin kylmäaine lämpenee. Lauhduttimessa kylmäaine lauhtuu eli nesteytyy luovuttaen lämpöä lauhduttimessa kiertävään veteen. Lauhduttimen jälkeen kylmäaine kulkeutuu paisuntaventtiilille, mistä kylmäaine kulkeutuu edelleen höyrystimelle ja kylmäaineen kierto alkaa alusta. (Hakala ja Kaappola 2013, 230.) Kylmäaineen kierto prosessi maalämpöpumpussa esitetään kuvassa 3.



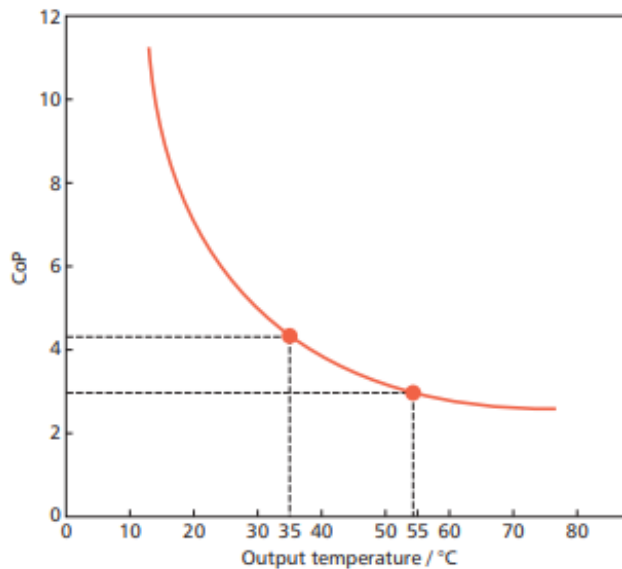
Kuva 3. Kylmäaineen kierto prosessi maalämpöpumpussa paine-entalpia tasossa (CIBSE 2013, 16).

Siirtääkseen lämpöenergiaa kylmästä tilasta lämpimään tilaan lämpöpumppuun on tuotava ulkopuolista työtä. Pääsääntöisesti maalämpöpumpun kompressorin toimii sähkömoottorilla.

Termodynamiikan ensimmäinen pääsääntö havainnollistaa yksinkertaisen lämpöpumpun toimintaa ja sitä, miten sähköenergian käyttö liittyy lämpöpumppuprosessiin. Sähköenergian käyttöä prosessissa voidaan havainnollistaa yhtälöllä 1:

$$Q_{in} + W_{in} = Q_{out} \quad (1)$$

jossa  $Q_{in}$  on lämpöpumpun ottama lämpö kylmästä tilasta,  $W_{in}$  on lämpöpumppuun tuotu ulkoinen työ ja  $Q_{out}$  on lämpöpumpun luovuttama lämpöenergia lämpimään tilaan. Yhtälön 1 avulla nähdään, että lämpöpumppuun tuodun ulkoisen työn määrä  $W$  vaikuttaa lämpöpumpun luovuttaman energian määrään  $Q_{out}$ . Mitä suurempi lämpötilaero on höyrytimen ja lauhduttimen välillä niin sitä enemmän lämpöpumppu tarvitsee ulkoista työtä eli sähköenergiaa. Ulkoisen työn määrä vaikuttaa lämpöpumpun hyötysuhteeseen, joka ilmaistaan usein lämpöpumpun lämpökertoimella. (Chiasson, D 2016, 310-311.) (Hakala ja Kaappola 2013, 230.) Esimerkiksi vesikiertoisella patterilämmityksellä varustetut saneerauskohteet tai lämpimän käyttöveden valmistaminen vaatii maalämpöpumpulta korkeampaa lämpötilatasoa verrattuna lattialämmityspiiriin ja siitä syystä maalämpöpumpun COP-arvo on heikompi lämmintä käyttövettä valmistettaessa tai vanhoissa vesikiertoisella patterilämmityksellä varustetussa rakennuksessa, mikä heijastuu suoraan maalämpöpumpun sähkön tarpeeseen. Kuvassa 4 on esitetty, miten maalämpöpumpulta vaadittava lämpötaso vaikuttaa maalämpöpumpun COP-arvoon. (CIBSE 2013, 17-22.)



Kuva 4. Y-akselilla on esitetty maalämpöpumpun lämpökerroin eli COP-arvo ja x-akselilla maalämpöpumpulta vaadittu lämpötilataso. Lämpötilatason ollessa 35 °C maalämpöpumpun COP-arvo on yli 4. Kun lämpötilataso nousee 55 °C niin COP-arvo on noin 3. (CIBSE 2013, 17.)

### 2.2.1 Maalämpöpumpun hyötysuhde

Kuten edellisessä osiossa tuotiin esille niin maalämpöpumppu siirtää sähkön avulla lämpöenergiaa maapiiristä rakennuksen lämmityspiiriin. Maalämpöpumpun hyötysuhdetta kuvataan lämpökertoimella eli COP-arvolla (Coefficient of Performance), mikä kertoo yksinkertaisesti sen, kuinka paljon lämpöenergiaa maalämpöpumppu tuottaa suhteessa siihen syötetyn sähkön määrällä. Lämpökerroin eli COP lasketaan yhtälöllä 2:

$$COP = \frac{Q_{out}}{W_{in}} \quad (2)$$

jossa  $COP$  on lämpöpumpun lämpökerroin,  $Q_{out}$  on lämpöpumpun luovuttama lämpöenergia ja  $W_{in}$  on lämpöpumppuun tuotu sähköenergia. Lämpökerrointa laskiessa on huomioitava se, onko kyseessä pelkän lämpöpumpun kompressorin vai koko lämpöpumpun lämpökerroin sekä missä olosuhteissa arvo on ilmoitettu. (Grassi, W 2018, 6.) (Hakala ja Kaappola 2013, 230.) Jos maalämpöpumpun COP-arvo on esimerkiksi 3, tarkoittaa se käytännössä sitä, että lämpöpumppu tuottaa yhtä kulutettua sähköyksikköä kohti kolme yksikköä lämpöä (Juvonen ja Lapinlampi 2013, 26).

## 2.2.2 Maalämpöpumpun mitoitus

Maalämpöpumppu mitoitetaan rakennuksen lämmitystehotarpeen mukaan. Maalämpöpumppu voidaan mitoittaa niin, että kompressorilla tuotetaan kaikki rakennuksen lämpöenergia ja tätä mitoitusta kutsutaan täystehomitoitukseksi. Tehomitoitus on yleensä järjestelmän käyttö- ja investointikustannusten optimointia. Vaikka lämpöpumpun tehoksi valitaan esimerkiksi noin 60 % huipputehosta, voidaan sillä tuottaa lähes 90 % rakennuksen tarvitsemasta lämpöenergiasta vuositasolla, koska todella kylmiä ajanjaksoja on suhteellisen lyhyen jakson ajan vuoden aikana. Osatehomitoitus tarvitsee lisälämpöä kattaakseen rakennuksen vaatiman huipputehon ja maalämpöjärjestelmissä huipputehon tarve katetaan sähkövastuksilla tai sähkökattilalla. (Hakala ja Kaappola 2013, 242.) (Juvonen ja Lapinlampi 2013, 26.)

Lämpöpumpputyyppejä valittaessa tulee ottaa huomioon lämpimän käyttöveden tarve, sillä korkeampi lämpötilataso heikentää lämpöpumpun hyötysuhdetta. Jos käyttöveden tarve on suuri, suositellaan yleensä käyttämään riittävän suurella vesivaraajalla varustettua järjestelmää. Käyttövesi voidaan tuottaa joko lämpöpumpulla, minkä tulistuslämpöä pystytään hyödyntämään käyttöveden lämmittämisessä tai vaihtoehtoisesti käyttövesi esilämmitetään ja ”priimataan” oikeaan lämpötilaan sähkövastuksilla. Jälkimmäisessä vaihtoehdossa lämpöpumppua voidaan käyttää mahdollisimman matalalla lauhtumislämpötilalla, jolloin lämpöpumpun hyötysuhde on mahdollisimman hyvä. (Hakala ja Kaappola 2013, 239-242.)

Maalämpöpumpun mitoitusta arvioitaessa voidaan apuna hyödyntää pysyvyyskäyrämenetelmää. Tällöin ulkolämpötilan pysyvyyskäyrä jaetaan eri lämpötilaväleihin, joille valitaan lämpöpumpun toimintalämpötila. Menetelmä olettaa, että eri lämpötilaväleillä lämpöpumpun toimintalämpötila pysyy vakiona ja että käyttövetä sekä tiloja lämmitetään vuorotellen, eikä järjestelmähäviöitä oteta huomioon. Suomessa lämmityskauden rajalämpötilana käytetään yleensä ulkolämpötilaa +12...+15 °C. Lämmityksen lähtötietona tarvitaan lämmitystehontarve ja lämpöpumpun lämmitysteho eri ulkolämpötiloilla. Käyttöveden lämmitystä varten tarvitaan tieto lämpimän käyttöveden energiankulutuksesta laskentajakson aikana sekä lämpötilataso, mihin käyttövesi lämmitetään. Laskenta antaa tuloksena mm. lämpöpumpun tuottaman lämmitysenergian sekä tarvittavan lisälämmitysenergian, mikäli lämpöpumppu ei ole täystehomitoitettu.

Lisäksi tuloksena saadaan lämpöpumpun tehomitoituspisteen, johon saakka lämpöpumpulla pystytään tuottamaan rakennuksen lämmitystehontarve. Jos lämpötila on alle tehomitoituspisteen, tarvitaan lisälämmityslähde. (Ympäristöministeriö 2012d, 14-18.)

### 2.2.3 Maalämpöpumpun ohjaus ja tehonsäätö

Maalämpöpumpun kompressoreita on pystyttävä käyttämään niiden nimelliskuormituksella eli nimellisteholla. On/off- säätö on yksinkertaisin tapa ohjata kompressoreiden käyntiä, mutta se on myös eniten energiaa kuluttavin tapa, sillä kompressori käy päällä ollessaan koko ajan vakionopeudella. On/off- säädössä termostaatille asetetaan asetuspistelämpötila, mikä katkaisee virran kompressorille, kun asetuspistelämpötila saavutetaan. Asetuspistelämpötilalle määritetään hystereesi eli lämpötilaero asetuspistelämpötilaan nähden. Kompressori käynnistyy uudestaan, kun lämpötilaero saavutetaan (asetuspistelämpötila vähennettynä hystereesillä). Hystereesin tulisi olla mahdollisimman pieni, jotta haluttu asetuspistelämpötila ei heiluisi liikaa. Toisaalta liian pieni hystereesi voi aiheuttaa kompressorille liian monta ylimääräistä päälle/pois- kytkentää. Liiallinen määrä kompressorin päälle/pois- kytkentöjä rasittaa kompressoria ja käyttömootoria mekaanisesti käynnistysvaiheiden aikana ja heikentää lämpöpumpun COP-arvoa sekä elinkaarta. (Grassi, W 2018, 30.)

On/off- säädössä on huomioitava myös laitevalmistajien määrittämät kompressorien minimi käyntiajat sekä minimi pysähdyssajat. Minimi käyntiajalla tarkoitetaan sitä, että joka kerta kun kompressori käynnistetään, pidetään kompressori käynnissä vähintäänkin tietty aika, vaikka asetuspistelämpötila saavutetaan. Minimi pysähdysajalla tarkoitetaan sitä, että joka kerta kun kompressori sammutetaan, pidetään kompressori pois päältä vähintäänkin tietty aika, vaikka termostaatti ohjaisi kompressoria päälle. Esimerkiksi lämpöpumppuvalmistaja Oilon ilmoittaa asennusohjeissaan minimi käyntiajaksi vähintään 5 minuuttia. (Oilon 2020, 266.)

Tehonsäädön kehittämiseksi ja käynnistysvaiheiden minimoimiseksi on kehitetty mm. kompressoreiden ohjaamista osakuormilla. Osakuormilla esimerkiksi monisynterisessä mäntäkompressorissa yksi tai useampi sylinteri on tehty tehottomaksi ohjaamalla kaasua sylinterin imusta poistoon, minkä avulla saadaan vähennettyä aktiivisten sylinterien määrää. Sylinterien määrän vähennystä suhteessa tehon vähennykseen on kuvattu taulukossa 1.

Taulukko 1. Aktiivisten sylinterin vähennys mäntäkompressorissa (Grassi, W 2018, 31. mukaillen)

Sylinterien määrä	Aktiiviset sylinterit	Kapasiteetti (%)	Tehon vähennys (%)
6	6	100	-
	4	67	1/3
	2	33	2/3

Taulukosta 1 nähdään, että vähentämällä aktiivisten sylinterien määrää saadaan tehoa vähennettyä ilman, että kompressoria tarvitsee sammuttaa ja näin ollen vältetään kompressorien ylimääräiset käynnistyskerrat tehoa säädettäessä.

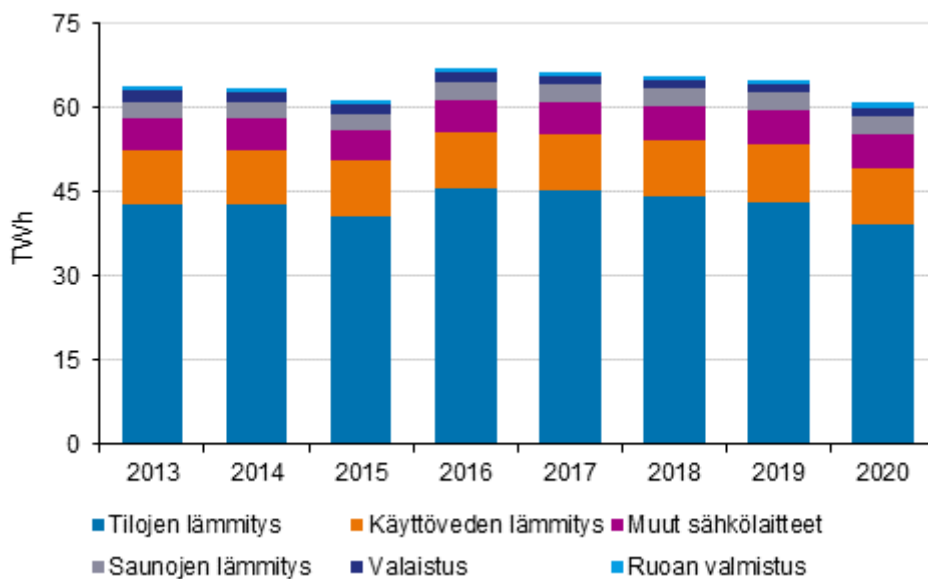
Sähkömoottorilla käytettävien kompressoreiden ohjaamiseen voidaan käyttää myös taajuusmuuttajaa. Taajuusmuuttajalla muutetaan kompressorille syötettävän sähkönsäätäjän taajuutta eri arvoon kuin suoraan sähköverkosta saatava taajuus. Muuttamalla kompressorin pyörimistaajuutta muutetaan kompressorin tuottamaa tehoa. Tällöin kompressorin toimii aina tarpeenmukaisella lämmöntuottoalueella, kun haluttu lämpötila muuttuu mitoitusolosuhteista esimerkiksi vuoden ajan vaihteluiden mukaan. Tällä menetelmällä saavutetaan mm. tarkka ja nopea kompressorin ja lämpötilan säätäminen, kompressorin tasainen käynnistys sekä tärkeimpänä hyvä hetkellinen COP-arvo eri mitoitusolosuhteissa. Taajuusmuuttajasäädöllä vältetään myös ”turhia” kompressorin käynnistyskertoja, sillä tehontarpeen vähentyessä lämpöpumppua ei tarvitse sammuttaa vaan se voidaan ohjata pienemmälle teholle pyörimisnopeutta säätämällä. (Grassi, W 2018, 31-35.)

### 3 Asuinkerrostalojen energiakulutus ja sisäilmasto-olosuhteet

Tässä kappaleessa kuvataan rakennusten energian käytön muodostumista, jotta pystytään arvioimaan kysyntäjouaston potentiaalia rakennuksen lämmitysenergiatarpeen avulla. Lisäksi kuvataan asuinrakennusten sisäilmasto-olosuhteiden reunaehtoja, jotta ne osataan ottaa huomioon kysyntäjousta suunniteltaessa. Aiheita käydään läpi niiltä osin kuin niiden tunteminen on tarpeellista kysyntäjouaston suunnittelussa.

Rakennuksilla on merkittävä rooli kokonaisenergian käytössä. Suomessa rakennusten energiankäyttö vastaa noin 40 % energian loppukäytöstä ja sen osuus kasvihuonepäästöistä on noin 30 %. Rakennuksen elinkaaren aikana rakennuksen suurin ympäristökuormittaja ja asumiskustannusten aiheuttaja on rakennusten energiankäyttö. (Motiva, 2020.)

Vuonna 2020 asumiseen kului energiaa Suomessa noin 61 TWh, mikä vastaa noin 18 % kokonaisenergiankulutuksesta. Kuvasta 5 nähdään, että asumisen kokonaisenergian kulutuksesta suurin osa eli noin 2/3-osaa kuluu tilojen lämmitykseen ja seuraavaksi eniten käyttöveden lämmitykseen. (Tilastokeskus, 2021.)



Kuva 5. Asumisen energiakulutus Suomessa 2013-2020 (Tilastokeskus, 2021).

### 3.1 Asuinkerrostalon sisäilmasto-olosuhdevaatimukset ja käyttöveden vaatimukset

Rakennukset tulee suunnitella ja rakentaa kokonaisuutena niin, että oleskeluvyöhykkeellä saavutetaan kaikissa tavanomaisissa sääoloissa ja käyttötilanteissa, turvallinen, terveellinen ja viihtyisä sisäilmasto. Tavoitteiden saavuttamiseksi suunnittelu- ja rakentamisvaiheessa on otettava yleensä huomioon rakennukseen vaikuttavat tekijät, mitkä ovat yleensä sisäiset kuormitustekijät, ulkoiset kuormitustekijät sekä sijainti ja rakennuspaikka. Sisäisiä kuormitustekijöitä ovat mm. henkilökuormat ja kosteuskuormitus. Ulkoisia tekijöitä ovat mm. ulkoilman laatu sekä sääolot. Turvallisen, terveellisen ja viihtyisän sisäilmaston saavuttamiseksi yhtenä toimenpiteenä käytetään mm. ilmanvaihto- ja ilmastointitekniisiä keinoja. (Ympäristöministeriö 2012a, 4.)

#### 3.1.1 Lämpöolosuhteet

Rakennus tulee rakentaa ja suunnitella niin, että oleskeluvyöhykkeen viihtyisä huonelämpötila voidaan ylläpitää käyttöaikana siten, että energiaa ei käytetä tarpeettomasti. Lämmityskaudella huonelämpötilan asetusarvona oleskeluvyöhykkeellä käytetään yleensä lämpötilaa 21 °C ja kesäkaudella yleensä 23 °C. Hyväksyttävänä poikkeama pidetään huonetilan keskellä 1,1 metrin korkeudella +/- 1 °C. Joissain tapauksissa, perustellusta syystä, huonelämpötila voidaan suunnitella ohjearvosta poikkeavaksi ja tällaisia tilakohtaisia poikkeamia on esitetty taulukossa 2. (Ympäristöministeriö 2012a, 5.)

Taulukko 2. Lämmityskauden huonelämpötilan tilakohtaisia ohjearvoja tiloille, joiden huonelämpötilan suunnitteluarvo ei ole 21 °C (Ympäristöministeriö 2012a, 5. mukailten).

Tila	Huonelämpötila °C
Porrashuone	17
Kylpyhuone, pesuhuone	22
Kuivaushuone	24

Lämpötilojen ylläpitämisen suunnittelussa on huomioitava mitoittavat ulkolämpötilat, jotka ovat paikkakuntakohtaisia ja ne on esitetty taulukossa 3.



Taulukko 3. Lämmityskauden mitoittavat ulkolämpötilat (Ympäristöministeriö 2012a, 5. mukailten).

Alue	Mitoittava ulkolämpötila °C
Etelä-Suomen lääni	-26
Ahvenanmaan lääni	-26
Länsi-Suomen lääni	-26
Itä-Suomen lääni	-32
Oulun lääni	-32
Lapin lääni	-38

Rakentamismääräyskokoelman lisäksi sisäolosuhteiden suunnitteluun vaikuttaa *Sosiaali- ja terveysministeriön asetus asunnon ja muun oleskelutilan terveydellisistä olosuhteista sekä ulkopuolisten asiantuntijoiden pätevyysvaatimuksista*. Asetuksissa on määritelty toimenpiderajat huoneilman lämpötiloille, joiden ylityessä tilanteeseen on puututtava. Toimenpiderajat asuntojen lämpötiloissa on esitetty taulukossa 4.

Taulukko 4. Lämpötilojen toimenpiderajat asunnoissa (Sosiaali- ja terveysministeriö 2015. mukailten).

	Lämpötilojen toimenpiderajat °C
Asunnossa	
Huoneilman lämpötila lämmityskaudella	+ 18 – + 26
Huoneilman lämpötila lämmityskauden ulkopuolella	+ 18 – + 32
Seinäpinnan alin keskiarvolämpötila	+ 16
Lattiapinnan alin keskiarvolämpötila	+ 18
Alin pistemäinen pintalämpötila	+ 11

### 3.1.2 Lämmin käyttövesi

Suomessa huolehditaan lainsäädännön avulla legionelloositartuntojen seurannasta ja ennaltaehkäisystä sekä ohjataan torjuntatoimia esimerkiksi asunnoissa. Lisäksi useat kansainvälisenä yhteistyönä tehdyt legionellaohjeistot täydentävät lainsäädäntöä. EU:n juomavesidirektiivissä (2020/2184) on asetettu kiinteistössä käytetyn veden legionellapitoisuudelle enimmäisarvo  $< 1000$  pmy/l, jota veden ei tule ylittää. (Terveyden ja hyvinvoinnin laitos 2022.)

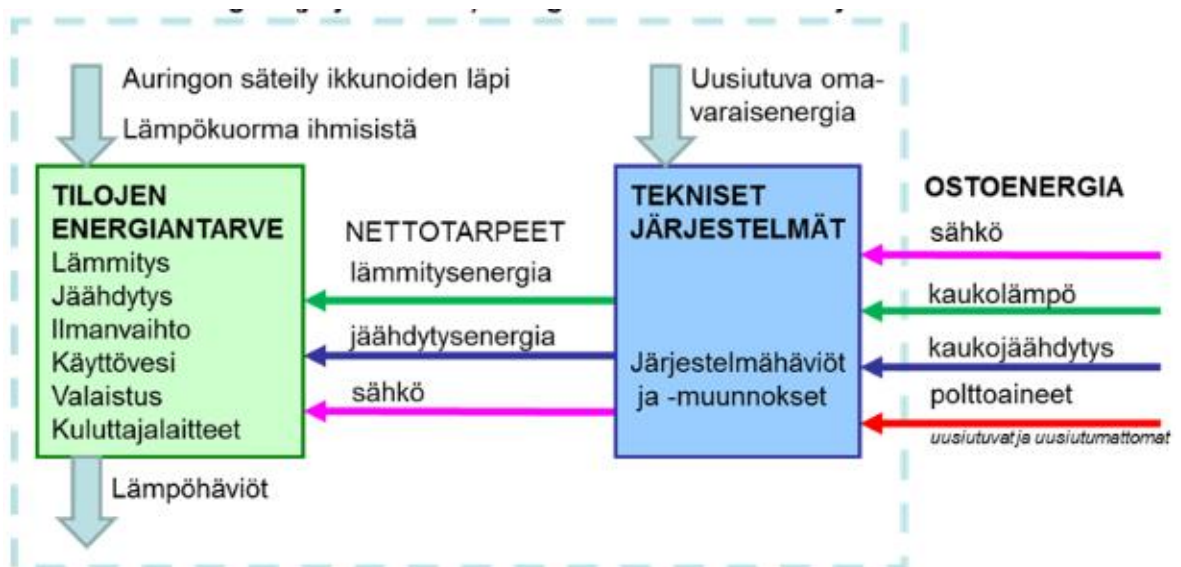
Ympäristöministeriön asetuksessa rakennusten vesi- ja viemäri-laitteistoille (Yma 1047/2017) määrätään, että rakennusten kylmävesijohto on suunniteltava ja asennettava siten, että veden lämpötila saa olla enintään  $20\text{ °C}$  ja vähintään 8 tunnin käyttämättömän jakson jälkeen veden lämpötila saa olla enintään  $24\text{ °C}$ . Vesikalusteesta on saatava lämminvesi 20 sekunnin kuluessa ja veden lämpötilan on oltava lämminvesilaitteistossa vähintään  $55\text{ °C}$ . Vesikalusteesta saatava veden lämpötila saa olla korkeintaan  $65\text{ °C}$ . (Terveyden ja hyvinvoinnin laitos 2022.)

Asumisterveysasetuksessa on määrätty lämpimän veden lämpötilat ennen vuotta 2007 rakennetuille lämminvesijärjestelmille. Näissä rakennuksissa lämminvesilaitteistosta saatavan lämpimän vesijohtoveden lämpötila tulee olla vähintään  $50\text{ °C}$  ja vesikalusteesta saatava vesi saa olla korkeintaan  $65\text{ °C}$ . Asumisterveysasetuksen soveltamisohjeessa minimilämpötila  $50\text{ °C}$  on tarkoitettu legionellabakteerin kasvun ehkäisemiseksi siten, että vesijohdon kaikissa osissa saavutetaan kyseinen lämpötila. Lämpötilalla ei tarkoiteta siis pelkästään lämminvesivaraajalta lähtevän veden lämpötilaa vaan kyseinen lämpötila on saavutettava jokaisella lämminvesihanalla. Edellämainituista raja-arvoista huolimatta lämpötilat voivat olla vesijohto-osuuksissa odotusaikana säädettyä arvoa pienempiä ja lisäksi sellaisissa poikkeuksellisissa tilanteissa, joissa esimerkiksi runsaan vedenkäytön seurauksena varaaja ei tuota riittävää määrää lämmintä vettä. Asumisterveysasetuksen maksimilämpötilavaatimus koskee erityisesti henkilökohtaiseen puhtaanapitoon tarkoitetuista lämminvesikalusteista ja muualla lämminvesilaitteistossa, kuten varaajassa, lämpötilat voivat olla tätä arvoa suurempia. (Terveyden ja hyvinvoinnin laitos 2022.)

### 3.2 Rakennuksen energiantarve

Rakennustasolla tarkasteltuna rakennusten energiantarve muodostuu tilojen ja ilmanvaihdon lämmitys- ja jäähdytystarpeesta, käyttöveden lämmitystarpeesta sekä valaistuksen ja kuluttajalaitteiden sähköenergiatarpeesta. Lämmitysenergian nettotarve lasketaan lämmitysenergian tarpeen sekä rakennuksen poistoilmasta talteen otetun energian, rakennuksen tulevan auringon säteilyn ja sisäisten lämpökuormien erotuksena. Lämmitysjärjestelmän energiankulutusta laskettaessa otetaan huomioon järjestelmähäviöt, jotka muodostuvat lämmitysenergian luovutuksen, varastoinnin ja jakelun häviöistä sekä hyötysuhteet huomioon ottaen. (Ympäristöministeriö 2012c, 12.)

Kuva 6 havainnollistaa energiakulutuksen taserajaa. Ostoenergia on energiaa, mikä tarvitaan kattamaan tilojen energiantarve sekä häviöt energian siirtymisessä. Maalämpöjärjestelmän tuottama energia voidaan ajatella olevan kuvassa 6 ostoenergiaa, vaikka sitä ei tosiasiaassa osteta energiayhtiöltä. Uusiutuva omavaraisenergia voi olla esimerkiksi aurinkosähköä- tai lämpöä. Rakennuksen ostoenergia käsittää lämmitys-, ilmanvaihto- sekä jäähdytysjärjestelmien ja niiden apulaitteiden, kuten pumput ja puhaltimet, kuluttajalaitteiden ja valaistuksen energiankulutuksen.



Kuva 6. Ostoenergian energiakulutuksen taseraja (Ympäristöministeriö 2012c, 12).

Tämän työn tarkoituksena on tutkia maalämpöjärjestelmän kysyntäjouaston potentiaalia ja sen vuoksi tässä kappaleessa keskitytään lämmityksen energian- ja tehotarpeen muodostumiseen.

### 3.2.1 Lämmitysenergian- ja tehon tarve

Lämmitystehontarve lasketaan yleensä tilakohtaisesti eli lasketaan tilassa tarvittava lämmitysteho, jonka jälkeen mitoitetaan ja valitaan tilakohtaiset lämmityslaitteet. Lämmitystehontarpeeseen vaikuttaa ulkolämpötila sekä rakenteiden johtumislämpöhäviöt, ilmanvaihto ja ilmapuodot. Koko rakennuksen lämmitystehon tarve saadaan summaamalla kaikki tilakohtaiset ja samanaikaiset lämmitystehontarpeet, johon lisätään mahdollinen ilmanvaihdon tuloilman lämmitystehontarve sekä lämpimän käyttöveden samanaikainen tehontarve. (Ympäristöministeriö 2012c, 59.)

Varaavissa järjestelmissä lämmöntuottolaitteistot voidaan mitoittaa lasketusta lämmitystehontarpeesta poiketen. Varaajiin tai varaaviin rakenteisiin pystytään tuomaan vuorokautinen energia muutamissa tunneissa ja teho on tällöin moninkertainen jatkuvaan tehontarpeeseen nähden. Suuret hetkittäiset tehohiiput, kuten lämpimän käyttöveden tarpeet, pystytään ottamaan varaajasta, jolloin varaajaa voidaan lämmittää hitaasti ja pienemmällä teholla seuraavaa käyttöä varten. Tällaisessa jaksollisessa taikka osa-aikaisessa lämmityksessä käytettävien laitteiden mitoitus riippuu palautuslämmityksen aikaisesta tehontarpeesta, johon vaikuttavat mm. lämpötilan sallittu lasku, lämmitysjakson pituus sekä rakenteiden lämpökapasiteetti. (Ympäristöministeriö 2012c, 59.) Jos lämmin käyttövesi lämmitetään varaajassa niin varaajan latausteho on pienempi kuin käyttöveden lämmitysteho mitoitusvirtaamalla ja varaajan latausteho sekä varauskyky mitoitetaan yleensä vastaamaan vuorokauden kulutusta (Ympäristöministeriö 2012c, 60).

Lämmitystehontarve lasketaan summaamalla samanaikaiset tehontarpeet yhtälön 3 mukaan:

$$\varphi_{\text{lämmitys}} = \frac{\varphi_{\text{tila}}}{\eta_{\text{tilalämmitys}}} + \frac{\varphi_{\text{tuloilmapatteri}}}{\eta_{\text{tuloilma}}} + \frac{\varphi_{\text{lkv}}}{\eta_{\text{lkv}}} \quad (3)$$

jossa  $\varphi_{\text{lämmitys}}$  on rakennuksen lämmitystehon tarve [W],  $\varphi_{\text{tila}}$  on tilojen lämmitysjärjestelmän lämpötehon tarve [W],  $\varphi_{\text{tuloilmapatteri}}$  on ilmanvaihdon tuloilman lämmitysjärjestelmän lämpötehon tarve [W],  $\varphi_{\text{lkv}}$  on käyttöveden lämmitysjärjestelmän lämpötehon tarve [W],  $\eta_{\text{tilalämmitys}}$  on tilalämmitysjärjestelmän hyötysuhde mitoitusolosuhteissa,  $\eta_{\text{tuloilma}}$  on

ilmanvaihdon tuloilman lämmitysjärjestelmän hyötysuhde mitoitusolosuhteissa ja  $\eta_{lkv}$  on käyttöveden lämmitysjärjestelmän hyötysuhde mitoitusolosuhteissa. (Ympäristöministeriö 2012c, 60.)

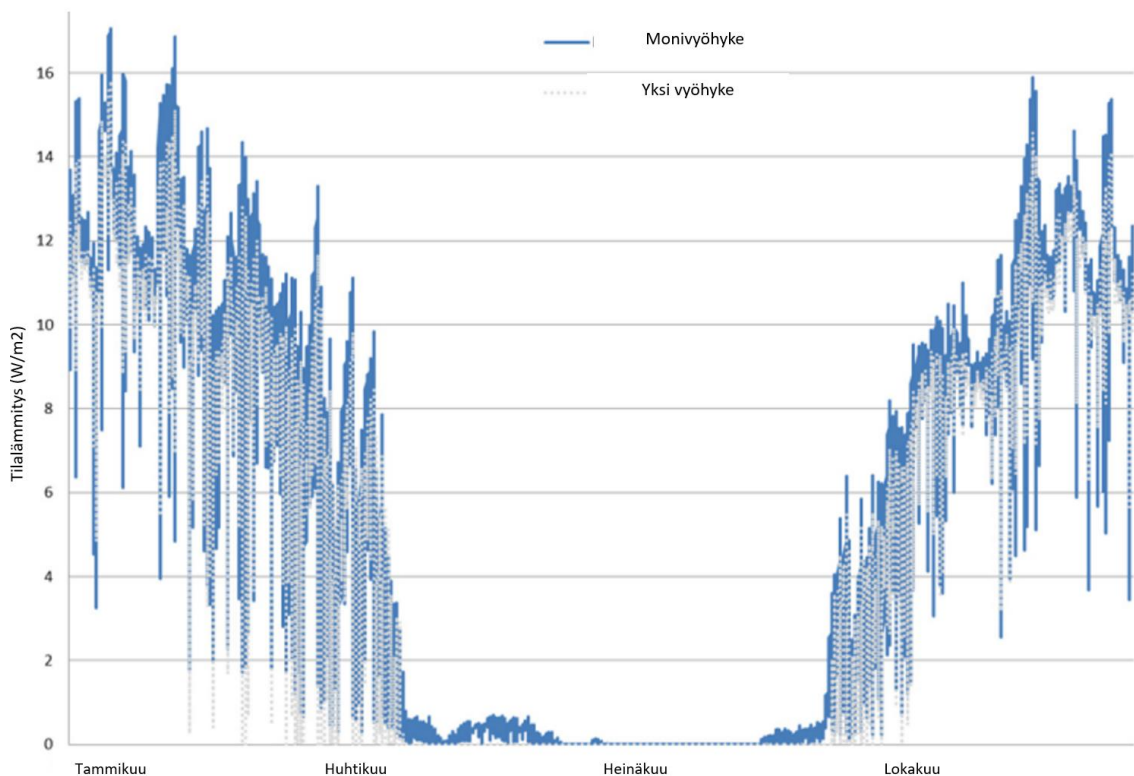
Rakennuksen lämmitysenergian tarpeella tarkoitetaan rakennuksen sisäilmasto-olosuhteiden ylläpitämiseen sekä lämpimän käyttöveden lämmittämiseen tarvittavaa energiamäärää. Lämmitysenergian nettotarpeella tarkoitetaan energiaa, joka tuodaan lämmitysjärjestelmien avulla tiloihin, ilmanvaihtoon ja käyttöveteen. (Ympäristöministeriö 2012c, 3.) Lämmitysenergian tarpeen laskennassa on huomioitava ulkolämpötilojen vaihtelu. Energialaskennassa energian tarve voidaan laskea käyttäen hyväksi kuukausittaisia ulkoilman keskilämpötiloja, josta on esitetty esimerkki taulukossa 5. Koska energian tarve riippuu ulkolämpötilasta, voidaan taulukon avulla arvoida, että suurin energian tarve painottuu joulun- ja maaliskuun ajanjaksolle, jolloin kuukauden keskilämpötila on pakkasen puolella.

Taulukko 5. Säätiiedot kuukausittain säävyöhykkeellä I ja II. Helsinki-Vantaa. (Ympäristöministeriö 2012b, 5. mukailten).

Kuukausi	Ulkoilman keskilämpötila, $T_u$ , °C
Tammikuu	-3,97
Helmikuu	-4,50
Maaliskuu	-2,58
Huhtikuu	4,50
Toukokuu	10,76
Kesäkuu	14,23
Heinäkuu	17,30
Elokuu	16,05
Syyskuu	10,53
Lokakuu	6,2
Marraskuu	0,50
Joulukuu	-2,19

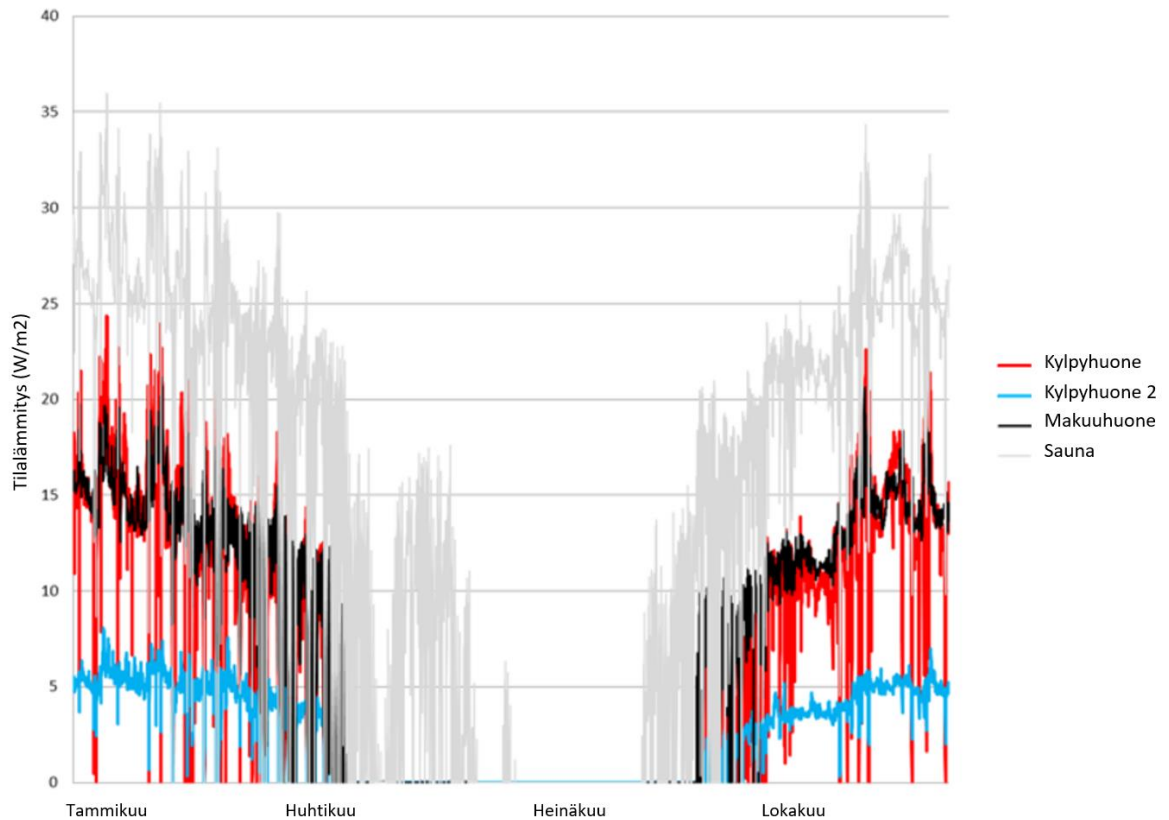
Airaksinen ja Vuolle (2013) ovat tutkineet ja vertailleet rakennuksen lämmitysenergian ja huipputehon tarvetta Suomen rakentamismääräyskokoelman minimivaatimusten mukaan rakennetussa rakennuksessa sekä matalaenergiarakennuksessa. Tutkimuksessa on tutkittu

mm. miten rakennuksien lämmönvarastointikyky vaikuttaa rakennuksen energiankulutukseen. Tutkimuksen tuloksien perusteella suurempi energiakulutus oli rakennuksella, joka on rakennettu Suomen rakentamismääräyskokoelmin vähimmäisvaatimusten mukaan. Lisäksi tutkimuksen mukaan rakennuksen kyvyllä varastoida lämpöä (lämpömassalla) ei ollut niin suurta merkitystä vertailukohteiden välillä ja esimerkiksi ikkunoiden U-arvolla oli suurempi merkitys energiankulutukseen. Tutkimuksessa vertailtiin myös vyöhykekohtaista-mallinnusta (asuntokohtaista) monivyöhyke-mallinnukseen (useampi asunto). Tuloksien perusteella pelkkiä yksittäisiä asuntoja mallinnettaessa huipputehontarpeet ovat pienemmät ja lämmitystunnit selvästi pienempiä. Sen vuoksi monivyöhyke-mallinnus antaa todellisemman kuvan tehontarpeeseen. Yhden vyöhykkeen mallinnuksen oletusarvoista johtuen vyöhykekohtaiset virheet voivat nousta suuriksi. Kuva 7 osoittaa erot tehontarpeessa neliötä kohti ( $\text{W/m}^2$ ) vyöhyke-mallinnuksen ja monivyöhyke-mallinnuksen välillä. (Airaksinen ja Vuolle 2013.)



Kuva 7. Tilalämmityksen tehontarve ( $\text{W/m}^2$ ) yksittäisessä vyöhyke-mallinnuksessa ja monivyöhykemallinnuksessa massiivisessa matalaenergiatalossa. Tummempi viiva osoittaa tulokset monivyöhyke-mallinnuksessa ja vaaleampi viiva yhden vyöhykkeen mallinnuksen tuloksia. (Airaksinen ja Vuolle 2013, 10.)

Tutkimuksessa vertailtiin myös eroja yhden vyöhykkeen (asunnon) sisällä ja havaittiin (kuva 8), että yhden asunnon huoneiden välillä on suuria eroja huipputehontarpeessa, mikä johtuu mm. auringon lämmittävästä vaikutuksesta sekä ilmanvaihdosta.



Kuva 8. Tilalämmityksen tehontarve ( $\text{W/m}^2$ ) huoneittain (Airaksinen, Vuolle 2013, 10 mukailten).

Absoluuttinen tehontarve kuvassa 8 on sama kuin kuvassa 7, mutta koska huoneet sijaitsevat eri julkisivuilla, tilojen lämmitystehontarpeessa on suuria eroja. Lisäksi lämmitystehontarpeeseen tilojen välillä vaikuttaa mm. huoneen ulkoseinien pinta-ala sekä se, onko huoneessa tulo- vai poistoilmapäätelaite. Tutkimuksesta saadaan myös selville, että energiatehokkaiden rakennusten huipputehontarveet ovat vähentyneet, mutta vähennys ei ole yhtä merkittävä kuin saavutettu vähennys energiankulutuksessa, erityisesti kylmissä ilmasto-olosuhteissa. (Airaksinen ja Vuolle, 2013.)

## 4 Sähköjärjestelmät- ja markkinat Suomessa

Suomi on osa yhteispohjoismaista sähköjärjestelmää yhdessä Norjan, Ruotsin ja Itä-Tanskan järjestelmien kanssa. Suomen sähköjärjestelmä koostuu voimalaitoksista, kantaverkosta, suurjännitteisistä jakeluverkoista, jakeluverkoista sekä sähkön kuluttajista. Sähkön kuluttajat koostuvat mm. teollisuudesta, julkisesta sektorista, yksityisestä sektorista sekä kotitalouksista. Pohjoismainen sähköjärjestelmä on yhdistetty Venäjän ja Baltian voimajärjestelmään Suomen kautta kulkevilla tasasähkökaapeleilla. Vaikka fyysinen yhteys Venäjään on olemassa, sähköntuonti Venäjältä on loppunut vuonna 2022. Tämän lisäksi pohjoismaiden sähköjärjestelmä on kytketty tasasähköyhteyksin myös Keski-Euroopan sähköjärjestelmään. (Fingrid 2022b.)

Euroopan vihreän kehityksen ohjelman osana EU on asettanut itselleen sitovan tavoitteen saavuttaa ilmastoneutraalius vuoteen 2050 mennessä. Osana vuoden 2050 tavoitteita sekä välitavoitetta vuonna 2030, EU on valmistellut ilmasto-, energia- ja liikennelainsäädäntönsä tarkistusta, niin kutsuttua 55-valmiuspakettia, jotta nykyiset lait saadaan vastaamaan vuosien 2030 ja 2050 tavoitteita. 55-valmiuspaketti sisältää ehdotuksen uusiutuvia energialähteitä koskevan direktiivin tarkistamiseksi, jonka mukaan uusiutuvan energian osuuden tulisi olla vähintään 40 % vuoteen 2030 mennessä. (Euroopan Unionin neuvosto 2022.)

Osana ilmastonmuutoksen torjuntaa sääriippuvaisen uusiutuvan energian tuotannon lisääntyminen kasvaa. Tämä tarkoittaa sitä, että sähkön tuotantorakenteessa on edessään historialliset muutokset. Tuuli- ja aurinkovoimalle on tyypillistä tuotantomäärien ajallinen vaihtelevuus ja tuotantoa ei voida ajoittaa tarpeen mukaan korkean kulutuksen hetkiin vaan sähköä saadaan silloin, kun aurinko paistaa tai tuulee. Ajallinen tuotannon vaihtelevuus vaatii sähkön kulutuksen mukautumista tuotannon vaihtelevuuden mukaan sekä sähköjärjestelmän tehotasapainon hallintaa varten lisää säätökapasiteettia ja reservejä. Koska Suomi on osana Pohjoismaista sähköjärjestelmää osana myös osa Keski-Euroopan sähköjärjestelmää, Suomen sähkön hintaan ei vaikuta ainoastaan sähkön tuotantokustannusten hinta Suomessa vaan myös sähkön tuotantokustannusten hinta Keski-Euroopassa. (Energiateollisuus 2022.) Tulevaisuuden muuttuviin tilanteisiin ja tarpeisiin voidaan sopeutua kysyntäjouston avulla.



Tämän teoriaosuuden tarkoituksena on selvittää miten Suomen sähkömarkkinat toimivat. Tämän lisäksi selvitetään, miten sähkön hinta muodostuu sähkön käyttäjälle, koska sähkön hinta ohjaa sähkön käyttöä. Lisäksi selvitetään miten kysyntäjousto liittyy sähköjärjestelmän tehotasapainon hallintaan. Aiheita käydään läpi niiltä osin kuin niiden tunteminen on tarpeellista asuinkerrostalon maalämpöjärjestelmän kysyntäjoustopotentiaalin tutkimisessa ja esimerkiksi reservimarkkinoiden teknisiä liittymisvaatimuksia tai sähkömarkkinoiden toimintamalleja sähköntoimitussopimusten osalta ei käydä detaljitason lävitse.

#### 4.1 Sähkömarkkinalaki

Suomen sähkömarkkinat on avattu asteittain kilpailulle vuonna 1995 voimaantulleella sähkömarkkinalailla ja syksystä 1998 alkaen kaikki sähkön käyttäjät ovat voineet kilpailuttaa sähkön hankintaansa (Työ- ja elinkeinoministeriö 2022). Sähköverkkotoiminnan harjoittaminen Suomessa on luvanvaraista ja sitä saa harjoittaa vain Energiaministeriön myöntämällä luvalla (Finlex 2013).

Kantaverkko on sähkönsiirron runkoverkko ja Suomessa Fingrid vastaa kantaverkon toimivuudesta. Kantaverkon toimivuuden valvontaan kuuluu valvonta, käytön suunnittelu, tasepalvelu, verkon ylläpito, rakentaminen ja kehittäminen sekä sähkömarkkinoiden toiminnan edistäminen. Kantaverkko toimii sähkönsiirron runkoverkkona ja runkoverkkoon on liitetty suuret voimalaitokset ja tehtaot sekä alueelliset jakeluverkot. Suurin osa Suomessa kulutetusta sähköstä siirretään kantaverkon kautta eli kantaverkko palvelee sähkön tuottajia ja kuluttajia mahdollistaen eri osapuolien keskinäisen kaupan valtakunnan tasolla sekä valtakunnan rajat ylittävän kaupan. (Fingrid 2022b.)

Kuluttajille sähkö siirtyy kantaverkkoon liitettyjen jakeluverkkojen kautta. Sähkön jakelu on hajautettu liiketoiminta-alue ja siitä vastaa 78 jakeluverkkoyhtiötä. Sähkön jakeluverkkoyhtiöt ovat alueellaan monopoliasemassa ja niiden toiminta on sähkömarkkinalaissa säädeltyä. (Partanen 2019a, 4.) Sähkön jakeluverkkoyhtiöillä on sähkömarkkinalain asettama siirtovelvollisuus, millä tarkoitetaan sitä, että verkonhaltijan on kohtuullista korvausta vastaan myytävä siirto- ja jakelupalveluita niitä tarvitseville sähköverkon osapuolille siirtokyvyn rajoissa (Finlex 2013).

Kuvassa 9 on esitetty Suomen sähkön siirto- ja jakeluverkkojen toiminta. Suurin osa tuotannosta sekä tuonti on yhdistetty Fingridin kantaverkkoon. Kantaverkot on yhdistetty alue- ja jakeluverkkoihin, joiden avulla sähkö kulkeutuu käyttäjille.



Kuva 9. Sähkön siirto ja jakelu (Partanen 2019a, 9).

## 4.2 Sähkömarkkinat

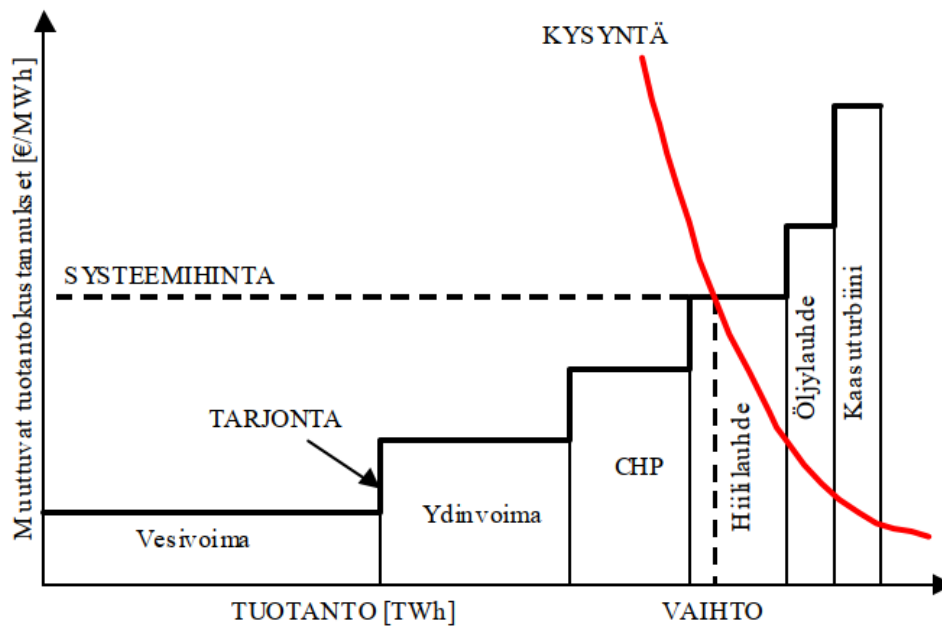
Sähkömarkkinat muodostuvat tukkumarkkinoista ja vähittäismarkkinoista. Vähittäismarkkinoilla sähkönmyyjä myy tukkusähkömarkkinoilta hankkimansa sähkön loppukäyttäjälle. Suomessa on noin 3,5 miljoonaa sähkökäyttöpaikkaa ja jokaisella tulee olla ilmoitettuna yksi avoin toimittaja sähkön saamiseksi kohteeseen. Sähkönmyynti on toimialana Suomessa erityisasemassa, sillä sähkö on välttämättömyyspalvelu. Alaa koskee erikoissääntely, joka rajoittaa vähittäismyynnin sopimusvapautta. Kilpailun mahdollistamiseksi kaikkea ei ole säännelty yksityiskohtaisesti, jolloin osapuolet voivat keskenään sopia myynnistä haluamallaan tavalla. (Energiavirasto 2022.)

Sähköjärjestelmän toimivuus edellyttää yhteistyötä siihen osallistuvien toimijoiden välillä, koska sähkön on kuljettava useamman verkonhaltijan kautta loppukäyttäjälle ja sähköenergialle on löydettävä aina ostaja. Sähkön jakelusta mittauksineen vastaavat verkonhaltijat ja sähkönmyyjät myyvät sähköjärjestelmään syötetyn sähköenergian. Sähkönmyyjän hankkima ja toimittama sähkö kirjataan myyjän taseeseen ja myyjä laskuttaa asiakkaita mittautiedon perusteella myyntisopimusten mukaisesti. Taseselvityksen perusteella osoitetaan kuinka paljon sähköenergiaa kukin osapuoli on tuottanut tai käyttänyt ja näin jokaiselle sähköerälle on löydettävissä maksaja. (Energiavirasto 2022.)

Sähkön tukkumarkkinoilla sähköä kaupataan pörssissä. Pohjoismaissa sähköpörssinä toimii Nord-Pool, jonka omistavat pohjoismaiset kantaverkkoyhtiöt. Nord-Poolin sähköpörssissä käydään kauppaa noin 70 % pohjoismaissa käytetystä sähköstä. Nord-Pool toimii sähkömarkkinoiden kauppapaikkana, missä sähkön ostajina toimivat suuret teollisuuslaitokset sekä sähkön jälleenmyyjät. Tukkuhinta muodostuu sähkön kysynnän ja tarjonnan perusteella eli käytännössä sähkön ostajat ilmoittavat pörssiin hinnan, millä hinnalla ja kuinka paljon he ostavat sähköä. Vastaavasti sähkön myyjät antavat omat tarjouksensa, kuinka paljon ja millä hintaa sähköä myydään. Nord-Poolin Elspot-markkinoilla sähköenergian systeemihinta muodostuu seuraavan vuorokauden jokaista tuntia kohden erikseen tarjouksien perusteella. Sähköntarpeen muuttuessa, esimerkiksi tuuliennusteiden äkillisten muuttumisten vuoksi tai voimalaitoksen häiriön vuoksi, on sähköntuottajan hankittava lisää sähköä myyntiään varten. Päivänsisäisiä muuttuvia tilanteita varten kauppaa käydään Elbas-markkinoilla, joilla sähkön hinta poikkeaa usein Elspot-hinnasta. (Fingrid ja Energiategollisuus 2010.)

Systeemihinta tarkoittaa sähköenergian hintaa koko pörssin markkina-alueella ja hinnassa ei oteta huomioon mahdollisia kapasiteettirajoituksia. Sähköenergian aluehinta ottaa huomioon kapasiteetin ja aluehintaan vaikuttaa käytössä oleva siirtokapasiteetti. Jos sähkön siirtoverkkojen kapasiteetti ylittyy niin alueelle muodostetaan omat kysyntä- ja tarjontakäyrät. Nord-Poolin markkinassa Suomi on yksi oma alueensa ja esimerkiksi Ruotsissa on neljä eri aluetta. Systeemi- ja aluehinnan lisäksi sähkön kokonaishinnan muodostaa sähkön siirtomaksut sekä sähköverot. (Partanen 2019b, 30-34.)

Sähkön hinta riippuu voimakkaasti tuotantotavasta. Kuva 10 havainnollistaa, miten sähkön kysynnän kasvu vaikuttaa sähköenergian markkinahintaan. Kysynnän kasvaessa sähköenergiaa joudutaan tuottamaan tuotantokustannuksiltaan kalliimmilla voimalaitoksilla, mikä nostaa sähkön hintaa. Vastaavasti kysynnän ollessa alhaisempi on sähkön hintakin alhaisempi, kun sähköä tuotetaan voimalaitoksilla, mitkä ovat tuotantokustannuksiltaan edullisempia.



Kuva 10. Sähköenergian markkinahinnan muodostuminen (Partanen 2019a, 22).

#### 4.2.1 Varttitase

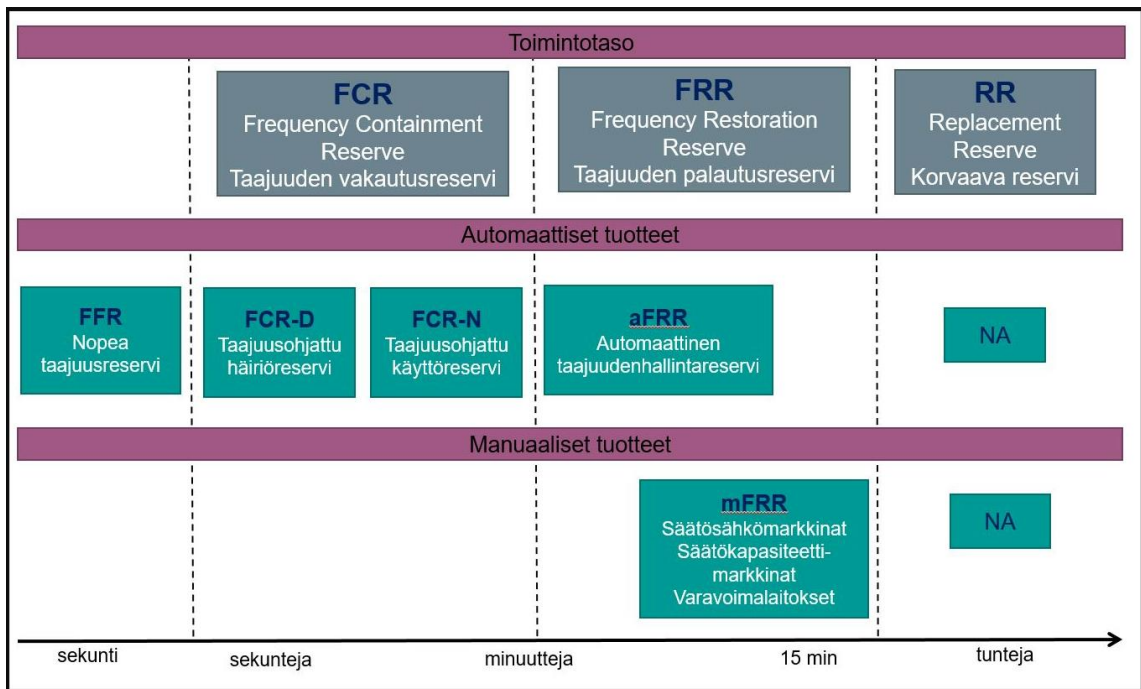
Vuonna 2022 sähköpörssissä sähköstä käydään kauppaa vielä tuntitasolla. Sään mukaan vaihtelevan tuotannon kasvaessa ja perinteisen säätökykyisen tuotannon vähentyessä sähkömarkkinamalli on päivitettävä yhteensopivammaksi tulevaisuuden tuotantorakenteen kanssa, jotta tuotannon ja kulutuksen tasapainotus toimii luotettavasti markkinahintojen ohjaamana. Energiajärjestelmän muutoksen vuoksi Suomessa ja Euroopassa ollaan siirtymässä lyhyempään taseselvitysjaksoon sekä kohti reaaliaikaisempia sähkömarkkinoita. Eurooppalainen tasehallinnan suuntaviiva velvoittaa EU:n jäsenvaltioita siirtymään 60 minuutin mittaisesta taseselvitysjaksoista 15 minuutin taseselvitysjaksoon ja Suomessa varttitase otetaan käyttöön vuoden 2023 toisen vuosineljänneksen loppupuolella. Taseselvityksen siirtäminen 15 minuutin jaksoon on ensimmäinen askel kohti 15 minuutin markkinoita. Aluksi tasepoikkeaman hinta tulee olemaan tunnin jokaisella vartilla sama ja viidentoista minuutin hinnoitteluun siirrytään myöhemmin, kun säätösähkön hinta määräytyy 15 minuutin perusteella ja Pohjoismaiden päivänsisäiset rajat ylittävät kaupankäynti siirtyy 15 minuutin resoluutioon. (Fingrid 2022d.)

### 4.3 Sähköjärjestelmän tehotasapaino ja reservimarkkinat

Sähkön tuotannon ja sähkön käytön on oltava joka hetki tasapainossa, jotta sähköjärjestelmä toimii. Sähkön tuotannon on seurattava sähkön kulutuksen muutoksia eli tehotasapainon on oltava joka hetki tasapainossa. Fingridillä on Suomessa järjestelmävastuu sähköjärjestelmän tehon tasapainon ylläpitämisestä eli tasehallinnasta. Suomessa sähköjärjestelmän taajuus tasapainotilassa on 50 Hz ja taajuuden sallitaan vaihtelevan välillä 49,9-50,1 Hz. Lähtökohtaisesti sähkömarkkinaosapuolet suunnittelevat tuotannon ja kulutuksen etukäteen tasapainoon, mutta käyttötunnin aikaisten poikkeamien tasapainotukseen tarvitaan reservejä. Reservejä on mm. energiavarastot, kulutuskohteet ja voimalaitokset, joiden tehoa muutetaan tarpeen mukaan. (Partanen 2019a, 13-14.) (Partanen 2019c, 3-4.) (Fingrid 2022c.)

Fingrid ylläpitää tehotasapainoa taajuusohjatuilla käyttöreserveillä sekä manuaalisesti toteutettavilla säädöillä. Kun sähköverkon taajuus laskee alle 50 Hz, eli kulutus on suurempaa kuin tuotanto, tarvitaan ylössäätöä, eli kulutuksen vähennystä tai tuotannon lisäämistä. Vastaavasti sähköverkon taajuuden noustessa yli 50 Hz, tuotantoa on enemmän kuin kulutusta, jolloin tarvitaan alassäätöä eli kulutuksen lisäystä tai tuotannon vähentämistä. (Fingrid 2022c.)

Taajuusohjattu reservi toimii automaattisesti aktivoitumalla taajuuden muutoksien mukaan. Jos taajuutta ei pystytä ylläpitämään pelkästään taajuusohjattujen reservien avulla, tehdään ylös- tai alassäätöjä manuaalisesti säätösähkömarkkinoilla. Reservituotteet jaotellaan käyttötarkoituksensa perusteella kolmeen eri ryhmään. Taajuuden vakautusreservejä käytetään jatkuvasti taajuuden hallintaa varten. Taajuuden palautusreservejä käytetään palauttamaan taajuus normaalialueelle sekä palauttamaan aktivoituneet vakautusresevit takaisin käyttöön. Korvaavilla reserveillä on varauduttu häiriötilanteiden jälkeisiin mahdollisiin uusiin vikatilanteisiin palauttamalla muut reservit takaisin valmiuteen. (Fingrid 2022c.) (Partanen 2019c, 3-4.) Kuvassa 11 esitetään reservituotteet niiden käyttötarkoitusten perusteiden mukaan.



Kuva 11. Reservituotteet (Fingrid 2022c).

Kuvan 11 alaosassa kuvataan aikaa, minkä aikana kukin reservituote toimii. Manuaaliset tuotteet aktivoidaan minuutteja kestäneen häiriön jälkeen ja automaattiset reservit toimivat sekuntitasolla. Reservit ovat voimalaitoksia, kulutuskohteita ja energiavarastoja, jotka pystyvät muuttamaan tehoan tarpeen mukaan reservin aktivoituessa. Sekuntitasolla toimivat reservit muodostuvat pienemmistä kulutuskohteista ja minuutti- sekä tuntitasoilla toimivat reservit muodostuvat suuremmista voimalaitoksista. (Fingrid 2022c.)

Asuinkerrostalojen maalämpöjärjestelmät ovat sähkötehojen kannalta tarkasteltuna pieniä kulutuskohteita, joten sen vuoksi yksittäiset maalämpöjärjestelmät eivät välttämättä täytä esiteltyjen reservilajien tehojen minimivaatimuksia, mutta yhdistämällä useampi maalämpöjärjestelmä yhdeksi kokonaisuudeksi saavutetaan reservien vaatimat minimitehot.

#### 4.3.1 Taajuusohjattu käyttö- ja häiriöreservi (FCR)

Taajuusohjatut käyttö- ja häiriöreservit aktivoituvat automaattisesti taajuudenmuutoksista. Niitä käytetään jatkuvaan taajuuden hallintaan toimien taajuuden vakautusreserveinä. Käyttöreservi on symmetrinen tuote eli reservin on pystyttävä sekä ylös- että alassäätöön. Alassäätö tarkoittaa sähkön kulutuksen vähentämistä ja ylösäätö vastaavasti sähkön

kulutuksen lisäämistä tai tuotannon lisäämistä. Häiriöreservi on jaettu erillisiin ylös- ja alassäätötuotteisiin. (Fingrid 2022c).

Taajuusohjatun käyttöresevin minimi säädön koko on 0,1 MW ja aktivoitumisaika 3 minuutin sisään. Taajuusohjatun häiriöreservin minimi säädön koko on 1 MW ja aktivoitumisaika siten, että viidessä sekunnissa tulee saavuttaa 50 % tehon vähennys/lisäys ja 30 sekunnissa tulee saavuttaa 100 % tehon vähennys/lisäys. Reservitoimittaja voi tarjota kapasiteettia sekä vuosi- että tuntimarkkoille. (Fingrid 2022c).

#### 4.3.2 Automaattinen taajuuden palautusreservi (aFRR)

Automaattinen taajuuden palautusreservi aktivoituu automaattisesti ja sen tarkoituksena on sekä sähköjärjestelmän taajuuden palauttaminen nimellistaajuuteen että taajuussäätöalueen tehotasapainon palauttaminen suunniteltuun arvoon. Reservin on pystyttävä ylös- tai alassäätöön tai vaihtoehtoisesti molempiin. Säädön vähimmäiskoko on 1 MW ja aktivoitumisaika enintään 5 minuuttia. Reservitoimittaja voi tarjota kapasiteettia ainoastaan tuntimarkkinoille. (Fingrid 2022c).

#### 4.3.3 Nopea taajuusreservi (FFR)

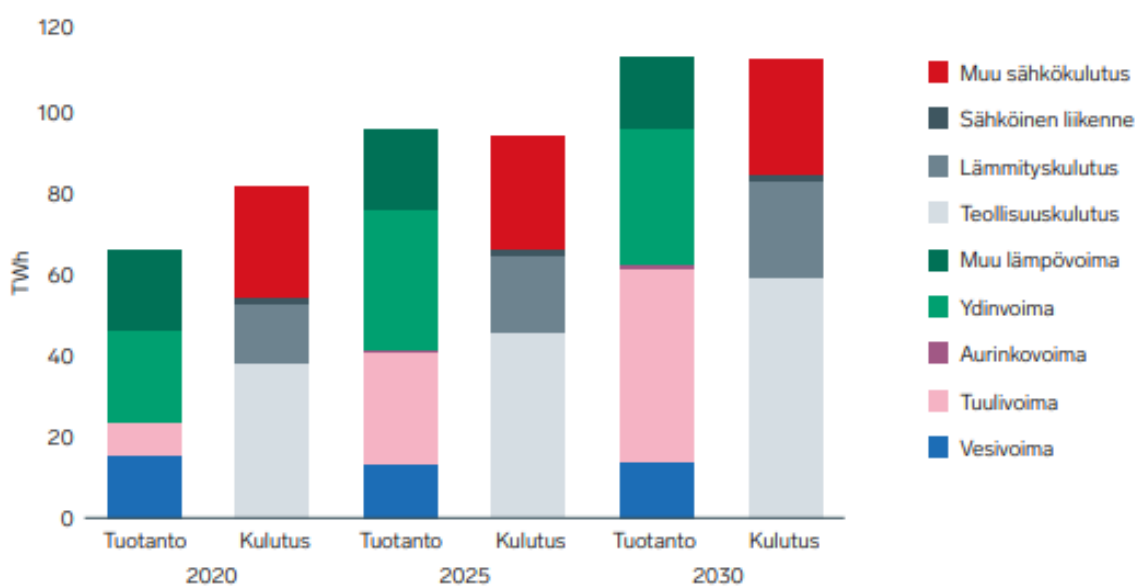
Nopeaa taajuusreserviä käytetään pienen inertian tilanteiden hallitsemiseksi. Tarvittavan reservin määrä riippuu sähköjärjestelmän sen hetkisestä inertian määrästä ja mitoittava vian suuruudesta. Reserviteho tulee aktivoida 0,7 – 1,3 sekunnin aikana riippuen aktivointitaajuudesta ja aktivoinnin vähimmäiskesto on 5 – 30 sekuntia riippuen deaktivoitinopeudesta. Reservin aktivointitaajuudet ovat 49,7 Hz, 49,6 Hz ja 49,5 Hz eli reservi toimii ylös- ja alassäätötuotteena. Lisäksi reservikohteen tulee kyetä aktivoitumaan 15 minuutin kuluessa edellisestä aktivointikerrasta. (Fingrid 2022c).

#### 4.3.4 Sähkön tuotantorakenteen muutoksien vaikutus reservien kysyntään

Fingridin yksi keskeinen kehitysajuri sähköverkon kehittämiseksi on käynnissä oleva sähkön tuotantorakenteen murros. Keskeisimpinä muutoksina ovat mm. sääriippuvaisen tuotannon lisääntyminen, säätökyvyisen tuotannon määrän väheneminen ja uudet suuret

ydinvoimalaitosyksiköt. Tuuli- ja aurinkoenergian lisääntyminen aiheuttaa sähköjärjestelmässä ajoittaista niukkuutta mm. joustavuudesta ja tehosta. Sähkön tuotannon säätökyvyn heikentyessä tulee sähkön kulutuksen säätökyvyn vahvistua. Tämä aiheuttaa myös hinnanvaihtelun lisääntymistä, mikä tuo liiketoimintamahdollisuuksia joustavalle tuotannolle, joustavalle kulutukselle sekä sähkön varastointiteknikalle. Sähköverkon kehittämisen kannalta säätökykyisen kapasiteetin supistumien lisää tarvetta mm. sähkön kysynnän joustolle. (Fingrid 2022a).

Etenkin tuulivoimakapasiteetin ennustetaan kasvavan merkittävästi vuoteen 2030 mennessä. Suomen tuulivoimakapasiteetti oli vuoden 2020 lopussa 2586 MW ja vuosituotanto 7,8 TWh mikä vastaa noin 10 % Suomen energiatuotannosta. Fingrid ennustaa tuulivoimakapasiteetin kasvavan noin 1000 MW 2020-luvun aikana, mikä tarkoittaisi tuulivoiman energiatuotannon olevan vuonna 2030 noin 33-53 TWh. Samalla Fingrid ennustaa sähkön käytön kasvua lämmityskäytössä, mitä ajaa etenkin lämpöpumppujen määrän kasvu kotitalouskohtaisessa lämmityksessä sekä kaukolämmön tuotannossa. (Fingrid 2022a). Fingridin ennuste Suomen sähkön tuotannosta ja kulutuksesta vuonna 2030 on esitetty kuvassa 12.



Kuva 12. Fingrid ennuste sähkön tuotannon ja kulutuksen kehityksestä Suomessa vuoteen 2030 mennessä (Fingrid 2022a).



Suomessa kotitalous- ja palvelusektorien osuus kokonaissähkön kulutuksesta on hieman yli puolet ja noin kaksi kolmasosaa huipputehon tarpeesta. Sähkökuormien ohjauksessa on siis merkittäviä mahdollisuuksia sekunti-, minuutti- ja tuntitason joustoon. Hallitsemalla kuormien ohjausta etänä automaattisesti perinteisen manuaalisen ohjauksen sijaan, mahdollistetaan käyttäjien sähkön kulutuksen optimointi tarpeen mukaan mikä näyttäytyy kuluttajalle myös matalamman sähkölaskun muodossa. Etänä ohjauksen hoitava ns. aggregaattori voi myydä joustoa sähkömarkkinoille tai verkkoyhtiöiden käyttöön, mikä mahdollistaa joustokapasiteetin lisääntymisen. Useammasta rakennuksesta koostuvaa, keskitetysti ja etänä hallinnoitavaa rakennuksien automaattista kuormien ohjausta kutsutaan virtuaaliseksi voimalaitokseksi. (Fingrid 2022a).

## 5 Kysyntäjousto

Euroopan ja Pohjoismaiden sähkömarkkinoille tulee koko ajan lisää uusiutuvia sähköntuotantolähteitä, jotka ovat riippuvaisia auringon paisteesta sekä tuulisuudesta. Vaihteleva uusiutuva sähkön tuotanto tekee siksi myös sähkön kulutuksen joustamisesta tärkeää. Sähkön tuotannon tehokkuuden lisäämiseksi sekä kustannusten alentamiseksi on esitetty vaihtoehtoa, että myös sähkön kuluttajat ottavat huomioon sähkön tuotannon vaihtelut. Kysyntäpuolen joustavuus vähentää tarvittavan tuotantokapasiteetin lisäksi myös sähköverkkoon kohdistuvaa huippukuormaa. Esimerkiksi Osllossa sähköntarve kylmimpinä tunteita, mikä edustaa noin 0,5 % koko vuoden tunneista, on noin 10 % suurempi kuin muina aikoina. Jos sähkön kysyntä joustaisi kylmimpinä aikoina 10 %, vältettäisiin huipputehon vaatimat sähköverkkoinvestoinnit sekä käynnistämästä fossiilisia sähköntuotantolaitoksia. Sähkölämmitteisissä asuintaloissa ja erityisesti sellaisissa järjestelmissä, joissa on vesivaraajat tai vesikiertoinen sähköllä toimiva lämmitys, on tutkittu olevan suuri potentiaali sähkön kysyntäjoustossa. (Nordic Council of Ministers 2017, 10.)

Tämän teoriaosuuden tarkoitus on selvittää mitä kysyntäjoustolla tarkoitetaan ja mitä kysyntäjousto tarkoittaa rakennuksen sähkönkulutusprofiilissa. Aiheita käydään läpi niiltä osin kuin niiden tunteminen on tarpeellista asuinkerrostalon maalämpöjärjestelmän kysyntäjouston potentiaalin tutkimisessa ja esimerkiksi sähkömarkkinoiden toimintamalleja erillisen aggregaattorin ja tasevastaavan välillä sähköntoimitussopimusten osalta ei käydä detaljitasolla lävitse.

### 5.1 Kysyntäpuolen joustavuus

Kysyntäpuolen joustavuuden vaihtoehtoja voidaan erotella toisistaan peruskuorman kysynnän vähentämiseen, kuorman kysynnän siirtämiseen sekä joustavuus huippukuorman vähentämiseen (kuva 13).



Kuva 13. Kysyntäpuolen joustavuuden vaihtoehtoja (Nordic Council of Ministers 2017, 20).

Kuvassa 13 on havainnollistettu tyypillinen sähkön päiväkuormituskäyrä Pohjoismaissa. Huipputuotanto- ja kulutukset ajoittuvat tyypillisesti aamuun ja iltapäivään. Tuotanto ja kulutus on tyypillisesti pienimmillään yöllä. Kylminä päivinä koko kuormituskäyrä siirtyy ylöspäin ja huipputehontarpeet ovat suuremmat verrattuna lämpimimpiin päiviin. (Nordic Council of Ministers 2017, 20.)

Peruskuorman kysyntää vähentämällä sähkön kuormituskäyrä siirtyy alaspäin, jolloin myös tarvittavan tuotannon määrän kysyntä siirtyy alaspäin ja kulutuspuolella energiankulutus vähenee. Peruskuorman vähentäminen on erityisen hyödyllistä silloin, kun uusiutuvan energiatuotannon tuotanto on vähäistä tai kylminä päivinä, sähkön kysyntä on korkeimmillaan. Sähkölämmitteisissä asuintaloissa peruskuormaa voidaan alentaa esimerkiksi sisälämpötilaa laskemalla. (Nordic Council of Ministers 2017, 20.)

Kuorman kysynnän siirtäminen ei tarkoita energiakulutuksen vähentämistä vaan kulutusta siirretään huippukuormitusjaksojen ulkopuolelle, jolloin sähkön hintakin on usein alhaisempi. Kysynnän siirtäminen leikkaa sähkön kuormituskäyrää tasaisemmaksi, jolloin huipputuotannon määrän tarve pienenee ja sähköverkon pullonkauloja vältetään, mutta energiankulutus ei muutu. Asuintaloissa kuorman kysyntää voidaan siirtää esimerkiksi lämmittämällä vesivaraaja lämpimäksi aamuyöstä ja estämällä lämmitys huippukuormitusjaksoilla. Huippukuormitusjaksojen jälkeen vesivaraajaa aletaan lämmittämään asteittain tehoa nostamalla, jotta vältetään uuden huippukuormitusjakson syntyminen. Kuormaa voidaan siirtää myös hyödyntämällä rakennuksen lämpöinerttia

varastoimalla lämpöä rakenteisiin ennen huippukuormitusjaksoja, jolloin huippukuormitusjakson aikana pudotetaan lämmitystehoa tai suljetaan lämmitys kokonaan. (Nordic Council of Ministers 2017, 20.)

Huippukuorman leikkaaminen tarkoittaa pienempää tehon tarvetta kompensoimatta vierekkäisiä jaksoja. Huippukuormaa leikkaamalla lievitetään tuotannon puutteita ja verkon pullonkauloja. Kulutuspuolella energiankulutus vähenee, kun huippukysyntä vähenee, mutta tämä tarkoittaa myös joustoa esimerkiksi sisäolosuhteissa. Asuinrakennuksessa huippukuormaa pystytään leikkaamaan esimerkiksi siten, että rakennuksen lämmitysjärjestelmässä ei sallita tilalämmityksen ja käyttöveden yhtäaikaista päälläoloa, jolloin joko lämmitysjärjestelmä tai käyttöveden lämmitys joustaa leikkauksen ajan. (Nordic Council of Ministers 2017, 20.)

#### 5.1.1 Lämmitysjärjestelmän joustavuus

Asuinrakennusten lämmitysjärjestelmät soveltuvat kysyntäpuolen joustoon erityisen hyvin tuntitasolla. Joustavuutta voidaan hyödyntää esimerkiksi aamulla sähkön hinnan ollessa korkeimmillaan joko nostamalla lämmitystä yöaikaan tai nostamalla lämmitystä päivällä, jolloin aamun tunneilla käytetään vähemmän sähköä. (Nordic Council of Ministers 2017, 14.)

Etenkin kuorman kysynnän siirtämisen on havaittu olevan potentiaalinen toimenpide sähköverkon tasapainottamiseen. Pohjoismainen ministerineuvosto viittaa oppaassaan *Flexible demand for electricity and power* Callawayn 2009 tutkimukseen, minkä mukaan termostaattiohjattuja kuormia voidaan hallita keskitetysti seuraamaan esimerkiksi tuulivoiman tuotannon vaihtelua minuuttitasolla. Lisäksi kyseisessä oppaassa viitataan Yhdysvalloissa vuonna 2011, Kondoh:n, Lu:n ja Hamestrom:n, tekemään tutkimukseen, jossa analysoitiin sähköisten vedenlämmittimien suoraa ohjausta tuulivoimatuotannon mukaan ja tuloksena havaittiin, että 33 000 sähköistä vedenlämmittintä vastasi noin 2 megawatin säätökapasiteettia 24 tunnin aikana. (Nordic Council of Ministers 2017, 30.)

Tasejaksoa lyhentämällä nykyisestä 60 minuutista 15 minuuttiin tarjoaa useammalle osapuolelle mahdollisuuksia liittyä kysyntäpuolen joustoon. Esimerkiksi lämmityksen tai lämminvesivaraajan lämmittämisen vähentäminen lyhyeksi ajaksi ei ole kysyntäpuolen

joustossa havaittavissa olosuhdemuutoksina lyhyellä ajalla, mutta tällaisten toimenpiteiden haitallisuus kasvaa jouston ajanjakson pidentyessä. (Nordic Council of Ministers 2017, 38.)

Asuinsektorilla on kirjallisuuden mukaan merkittävää potentiaalia osallistua kysynnän joustoon lämmitysjärjestelmillä. Rakennuskantaa on mahdollista ottaa käyttöön lämmönvarastona, jos sähköä käytetään suorasti tai epäsuorasti rakennusten lämmitykseen. Tämä helpottaa sähkömarkkinoiden tasapainoa, kun asuinrakennusten kysyntää voidaan siirtää sähkön tuotannon ja siirtoverkkojen kapasiteettien tarpeiden mukaisesti. (Nordic Council of Ministers 2017, 46.)

### 5.1.2 Rakennus lämpövarastona

Asuinrakennusten lämmitystä on mahdollista siirtää kalliilta sähköenergian tunneilta halvempiin varastoimalla sähköllä tuotettua lämpöä rakenteisiin ja varaajiin. Yksinkertaisimmillaan lämmön varastointi kuorman siirtoa varten tapahtuu esimerkiksi sallimalla sisälämpötilan asetusrvon olla normaalia korkeampi, jolloin lämpöä varautuu normaalia enemmän rakenteisiin. Kun sähkön hinta on korkea, sallitaan sisälämpötilan laskea normaalia alemmaksi. Tällöin sisälämpötila laskee ja rakenteisiin varastoitunut lämpö vapautuu. Tämä edellyttää sitä, että sisälämpötila on lämmön varastointihetkellä korkeampi kuin silloin, kun lämpöä vapautetaan rakenteista. Vapautuneen energian määrä on yhteydessä korkeimman ja alimman lämpötilan eroon. Sisälämpötilan vaihteluita voi rajoittaa terveysterveyden- ja sisäilmastonäkökulmat ja rajoittaa siten sallittua lämpötilavaihtelua. Potentiaalinen lisäämiseksi on mahdollista rakentaa lämmönvarastoja, kuten lisäämällä varaajakapasiteettia, mutta ne vaativat useimmissa tapauksissa suurempia investointeja. Tulevaisuuden rakennuksia on mahdollista suunnitella hyödyntämään paremmin niiden luontaista lämpömassaa huomioimalla rakenteiden lämpökapasiteetti. Esimerkiksi tiilellä ja betonilla on yleensä korkea lämpökapasiteetti verrattuna puuhun tai kipsiin, sillä betonilla ja tiilellä on suuri tilavuuslämpökapasiteetti. Lisäksi kivipohjaisilla materiaaleilla on suhteellisen alhainen lämmönjohtavuus ja sen seurauksena materiaalit vaimentavat lämpötilan vaihteluita. (Nordic Council of Ministers 2017, 48-49.)

## 5.2 Kysyntäpuolen jouston edellytykset

Kysyntäpuolen jouston toteuttamiseksi edellytetään reaaliaikaiset hinnoittelut, ohjaukset sekä mittaukset. Aggregaattoripalvelut ovat yksi vaihtoehto sähkön hinnan tuntivaihtelun seuraamiseen ja samalla aggregaattorit takaavat kantaverkkoyhtiölle varmuuden siitä, että kulutus vähenee kapasiteetin kiristyessä. (Nordic Council of Ministers 2017, 53.) Kantaverkkoyhtiöt ovat määrittäneet minimivaatimukset sähköteholle, joilla reservimarkkinoille voi osallistua. Minimi sähköteho vaatimusten lisäksi kantaverkkoyhtiöt edellyttävät, että reservikohteen tulee täyttää reservituotteiden tekniset vaatimukset mm. jouston pysyvyyden, sähkön mittauksen ja taajuuden säädön osalta. (Fingrid 2022c.)

### 5.2.1 Aggregaattori

Aggregaattorien avulla sähköteholtaan pienet kulutuskohteet voivat liittyä osaksi isompaa kokonaisuutta, jolloin joustoon osallistuminen on mahdollista myös pienempien kulutuskohteiden tai yksittäisten kotitalouksien osalta, joiden sähkötehot eivät yksittäisinä kohteina täytä markkinoilla vaadittua minimitehoa joustoon osallistumisesta (Nordic Council of Ministers 2017, 54). Aggregaattori yhdistää pienet kulutuskohteet isoksi kokonaisuudeksi ja hallinnoi kulutuskohteiden sähkön käyttöä reaaliajassa hinnan ja sähköverkon tarpeiden mukaan. Aggregaattorit koordinoivat toimintaa sekä sähkömarkkinoiden että verkonhaltijoiden suuntaan. Yksittäinen kulutuspiste voidaan antaa myös hallittavaksi aggregaattorille, joka ohjaa sähkökuormaa esimerkiksi hinnan mukaan. (Nordic Council of Ministers 2017, 12.)

## 5.3 Tutkimukset lämpöpumppujen kysyntäjoustopuolesta

Good et al., (2019) simuloivat omakotitalon ilmavesilämpöpumpun joustokykyä osateholla ja täydellä teholla. Useampi omakotitalo aggregoitiin yhdeksi kokonaisuudeksi, jotta joustoteho on riittävän iso verkkoyhtiön tarpeisiin. Lämpöpumppujen joustokapasiteetti simuloitiin Iso-Britannian kantaverkon käyttöreservin tarpeiden mukaan. Tutkimuksen mukaan lämpöpumppujen joustavuus ylös- tai alaspäin on yhtä suuri kuin lämpöpumpun yhteenlaskettu tehonsyötön määrä, jota voidaan vähentää tai lisätä nykyisestä tasosta alkaen.

Laskettu joustavuus on hetkellinen arvio, mikä perustuu lämpöpumpun ”normaaliin” toimintalämpötiloihin kullakin ajanhetkellä. Mikä tahansa muutos lämmöntuotannon pyynnössä nykyhetkessä vaikuttaa lämpöpumpun joustavuuteen seuraavana hetkenä. Jos lämpöpumppua käytetään kysyntäjoustopuolella useampina hetkinä peräkkäin, muuttuu alkuperäinen jouston määrä, koska lämpöpumpun on lisättävä tai vähennettävä lämmöntuotantoaan kompensoidakseen lämpöhäviöitä tai lämpöylimäärää. (Good et al., 2019.)

Tutkimuksen tulokset osoittivat, että lämpöpumppujen tehontarve jouston jälkeen vaihtelee huomattavasti asuntotyypistä riippuen. Tehon tarve jouston jälkeen on huomattavasti pienempi korkean lämpöinertian omaavissa rakennuksissa, kuin matalan lämpöinertian omaavissa rakennuksissa. Tutkimuksen simuloinneissa huomattiin, että vanhassa lattialämmitteisessä, korkean lämpöinertian rakennuksissa, sisälämpötila pysyy tasaisempina kuin uudemmassa, matalan lämpöinertian rakennuksissa. Korkean lämpöinertian rakennuksessa sisälämpötila kohoaa hitaammin kuin alhaisen lämpöinertian rakennuksissa eli sisälämpötila reagoi alhaisen lämpöinertian rakennuksissa nopeammin lämmönsyötön säätöön. Koska korkean lämpöinertian rakennuksissa lämpötilan muuttuminen on hitaampaa, myös lämpöpumpun tehon kasvaminen tai väheneminen on hitaampaa. Alaspäin joustettaessa, eli kulutusta lisäämällä, sisälämpötila kohoaa ylimääräisen lämmöntuotannon ja lämmönvarastoitumisen myötä, mikä johtaa lämmöntarpeen alenemiseen seuraavien tuntien aikana. Tutkimuksen simuloinneissa sisälämpötilan vaihtelu pysyi +/- 2,8 °C:n sisällä kun joustoa tehtiin täydellä kapasiteetilla kahden tunnin aikana, ulkolämpötilan ollessa noin 2 °C. (Good et al., 2019.)

Bruninx et al., (2015) tutkivat asuinrakennusten hiilijalanjäljen vähentämistä lämpöpumpun avulla sekä lisäksi lämpöpumpun kysyntäjouston avulla. Tutkimuksen mukaan suurin haaste asuinrakennusten lämpöpumppujen kysyntäjouston hyödyntämisessä on rakennustyyppien laaja vaihtelu eri ominaisuuksineen. Rakennustyyppi ja rakennuksen ominaisuudet vaikuttavat mm. kokonaislämmöntarpeeseen, lämpöpumpun hyötysuhteeseen, hintaan sekä huippusähkön kysyntään ja kuormansiirron potentiaaliin. Tutkimus käsitti Belgiassa sijaitsevan omakotitalon, jonka sähkönkulutus ja ominaisuudet skaalattiin vastaamaan 250 000 omakotitaloa. Kysyntäjoustopuolella hyödyntämällä esilämmitettiin rakennusta ja jouston aikana tehoa vähennettiin. (Bruninx et al., 2015.)

Tutkimuksen tuloksien mukaan kysyntäjoustopuominen osaksi lämpöpumppulämmitystä saavutettiin keskimäärin vielä noin 15 % lisävähennys hiilidioksidipäästöihin verrattuna lämpöpumppulämmitykseen ilman kysyntäjoustopuota. Hiilidioksidipäästöjen säästö koostui mm. siitä, että aktiivisen kysyntäjoustopuon ansiosta lämpöpumppujen sähköntarpeen kattamiseen tarvitaan vähemmän kaasuvoimaloita. Päästöt vähenivät myös sähkökuorman siirtymisen vuoksi, koska kuormaa siirtämällä voimalaitoksia ei tarvinnut käynnistää ja mikä johti siihen, että uusiutuvaa energiaa käytettiin suhteessa enemmän. Kuorman siirtäminen lämmitysjärjestelmissä johtaa tyypillisesti korkeampiin keskilämpötiloihin ja siten suurimpiin lämpöhäviöihin ja energiankulutukseen. Tutkimuksen tuloksien mukaan lämminvesivaraajaan lisätään kysyntäjoustopuon vuoksi noin 3 % enemmän lämpöenergiaa, jolloin varaajan vuotuinen keskilämpötila on 4 °C korkeampi. Patterilämmityksessä havaittiin, että huipputehon pienentyessä rakennukseen vapautuu suhteellisesti enemmän lämpöä ja että keskimääräinen energiankulutus kasvaa 5,5% ja sisälämpötila 0,5 °C. Lattialämmityksessä havaittiin, että keskimääräinen energiankulutus nousi 3,5 % ja sisälämpötila nousi 0,2 °C. Isossa kuvassa kysyntäjoustopu lisäsi rakennuksen sähkönkäyttöä 200 kWh vuodessa, mutta vähensi uusiutuvan energian tuotantoa 600 kWh ja kaasuvoimalan tuotantoa 400 kWh vuodessa per rakennus. Tästä näkökulmasta katsottuna sähkön tuotanto vähenee aina enemmän kuin sähkön kulutus lisääntyy. Lattialämmitteinen rakennus vähensi kaasuvoimalan tuotantoa vielä enemmän, yhteensä 550 kWh vuodessa per rakennus. (Bruninx et al., 2015.)

Ali et al. (2016) tutkivat lämpöenergian varastointia kysyntäjoustopuon ja lämpöpumpun avulla. Tutkimuksen rakennuksen mallina oli käytetty kaksikerroksista omakotitaloa, mikä sijaitsee Suomessa. Tutkimuksessa määriteltiin kysyntäjoustopuon varten kolme eri ohjausalgoritmia, joilla muutettiin kysyntäjoustopuon aikana sisälämpötilan asetusarvoa sekä varaajasäiliön asetusarvoa. Ohjausalgoritmit perustuivat reaaliaikaiseen sähkön SPOT-hintaan, menneisiin sähkön SPOT-hintoihin sekä tulevaan SPOT-hintaan. Suurin säästö saatiin aikaiseksi tulevaan SPOT-hintaan perustuvalla ohjauksella, minkä avulla saatiin noin 12 % säästöt kokonaisenergiankulutuksessa ja noin 10 % säästöt energiakustannuksissa. Normaalitylanteessa rakennuksen lämmityksen asetusarvo oli 21 °C ja lämminvesivaraajan asetustempötila 55 °C. Kaikki kolme kysyntäjoustopuon ohjausalgoritmiä säästivät lämmitysenergiaa kun varaajan asetustempötila oli alle 65 °C, mutta tuloksissa huomattiin, että varaajan lämpöhäviöt kasvavat samalla, kun kasvatetaan varaajan kokoa samalla tempötilatasolla. Tempötilatason kasvattaminen lisäsi myös lämpöhäviöitä ja energian



käyttöä. Energiakustannukset nousivat, jos varaajan lämpötila nostettiin yli 65 °C, mutta olivat normaalitapaukseen verrattuna alhaisemmat, jos lämpötila pysyi alle 65 °C. Tutkimuksen tulokset indikoivat, että sisälämpötilan nostaminen ei ole taloudellisesti järkevää, jos käytössä on riittävän suuri varaajasäiliö, sillä vertailtaessa ohjausalgoritmien tuloksia havaittiin, että energiakustannukset olivat pienimmät sillä strategialla, missä sisälämpötilan asetusarvona oli käytössä vain normaali asetusarvo tai asetusarvoa laskettiin, mutta ei missään vaiheessa nostettu. (Alimohammadisagvand et al., 2016.)

Jansen ja Muller (2019) demonstroivat laajamittaisen kysyntäjoukon vaikutuksia lämpöpumpuilla varustettuihin omakotitaloihin. Lämpöpumppuja ohjattiin energiamittaritietojen sekä ulkoilman lämpötilan mittauksen avulla, jota varten luotiin oma algoritmi. Algoritmin avulla välitettiin lämpöpumpulle käyntilupa siten, että kysyntäjoukon aikana lämpöpumppu kävi kysyntäjoukon ehdoilla ja muulloin, normaalissa käyttötilanteessa, lämpöpumppu sai käydä oman sisäisen automaation ohjaamana. Normaalissa käyttötilanteessa lämpöpumpun automaatio pitää huoneilman asetusarvossaan tietyn lämpötilajoustavuuden puitteissa. Kyseinen lämpötilajoustavuus määrittää lämpöpumpun kysyntäjoustopotentiaaliin, koska se määrittää lämpöpumpun ohjauksen ja tätä lämpötila-aluetta muutettiin kysyntäjoukosta varten. Tutkimukseen aggregoitiin 322 omakotitaloa, joista 209 käytti kysyntäjoukosta ja loput toimivat referenssiryhmänä. Kysyntäjoukon avulla aggregoitua lämpöpumppujen sähkötehonkuormaa vähennettiin 40-65 % verrattuna referenssiryhmän kuormaan. Kysyntäjoukon päätyttyä lämpöpumput palautuivat välittömästi nimellistehoihinsa, mikä aiheutti piikkejä sähkökuormiin. Kysyntäjoukon jälkeistä piikkikuormaa saatiin vähennettyä vapauttamalla lämpöpumppuja yksittäin, mutta tämä pidensi kysyntäjoukosta palautumisen kestoa. (Jansen ja Muller, 2019.)

### 5.3.1 Lämpöpumppujen ohjaustapojen muutos

Lämpöpumpuilla voidaan hyödyntää tehokkaasti olemassa olevaa rakennuskantaa lämmön varastointiin muuttamalla lämmöntuotannon ohjaustapaa perinteisestä mallista, mikä perustuu nykyisin pääosin lämmitysjärjestelmän lämmöntarpeen pyynnin mukaan ohjautuvaan malliin. Rakennusten lämpömassaa ja lämminvesivaraajia voidaan hyödyntää lämpöpumpun osittaiseen toiminnan siirtämiseen ilman, että rakennusten käyttäjille syntyisi

haittavaikutuksia. Perinteisesti lämminvesivaraajia aloitetaan lämmittämään, kun lämpötilan alaraja saavutetaan ja vastaavasti lämmitys pysähtyy, kun yläraja on saavutettu. Tällaisella ohjaustavalla ei hyödynnetä lämmön varastoinnin joustavuutta. Vaihtoehtoisilla ohjauksilla voidaan optimoida lämmityslaitteiden käyttöä, mikä tekee niistä sopivan kysyntäjouston. Huonommin eristetyt rakennukset korkeilla tehontarpeilla soveltuvat yleensä lyhyisiin kysyntäjoustojaksoihin johtuen korkeasta lämpöhäviöstä rakenteiden yli. Erityisesti patterilämmitteiset rakennukset ja korkeilla virtaamilla varustetut järjestelmät lämpeävät nopeasti ja ylöspäin joustaminen on lyhyempää kuin alaspäin joustaminen kun taas lattialämmitteiset rakennukset tarjoavat korkeamman potentiaalin lataukseen. (Dengiz et al., 2019.)

Perinteisestä ohjaustavasta poiketessa haittana on se, että rakennuksen lämmönvarastointikyky on korkeasti riippuvainen ympäristön olosuhteista, kuten ulkolämpötilasta, mikä rajoittaa kuorman siirtämistä kiinteästi johonkin ajanjaksoon ja ajanjakso voi vaihdella huomattavasti rakennuksen eristystavasta riippuen. Passiivinen lämmönvarastointi voi kuitenkin ylläpitää rakennuksen lämpömukavuutta hyvin eristetyissä rakennuksissa ja se olisi kustannus- ja hyötynäkökulmasta parempi vaihtoehto kuin aktiivinen varastointi varaajasäiliöihin. (Bertsch et al., 2020.)

Alimohammadisagvand et al. (2017) tutkivat julkaisussaan *Comparison of four rule-based demand response control algorithms in an electrically and heat pump-heated residential building* kysyntäjouston vaikutuksia energiakulutukseen ja energiakustannuksiin kahdella erilaisella lämmöntuotantojärjestelmällä omakotitaloon kylmissä olosuhteissa. Lämmöntuotantomuotoina tutkittiin maalämpöjärjestelmää varaajilla sekä vesikiertoista sähkölämmitystä varaajilla. Lämmitysjärjestelmän ohjauksille tehtiin kysyntäjouston ohjausalgoritmit, joita tutkittiin lämmöntuotantojärjestelmille. Ohjausalgoritmit perustuivat sähkön tuntihintoihin ja skenaariot mallinnettiin IDA-ICE työkalulla. Tutkimuksen mukaan energiakustannuksia- ja kulutusta voidaan vähentää käyttämällä sähkön tuntihintaa lämmöntuotantojärjestelmän ohjaavana signaalina muuttamalla sisälämpötilan asetusarvoa sekä vesivaraajien asetusarvoja. (Alihommadisagvand et al., 2017.)

## 6 Asuinkerrostalon lämmitysjärjestelmän kysyntäjoustopotentialin simulointi

Tässä kappaleessa tutkitaan kysyntäjoustopotentialin vaikutuksia sisäolosuhteisiin ja selvitetään vaikuttaako kysyntäjoustopotentialin asuinrakennuksen energiakulutukseen mallintamalla case-asuinkerrostalo IDA ICE- simulointiohjelmalla. Ida Indoor Climate and Energy on simulointiohjelma, jonka avulla voidaan mallintaa tarkasti rakennus järjestelmineen sekä säätölaitteineen simulointiympäristöön. Simulointien avulla voidaan tutkia rakennuksen energiakulutusta ja lämpötasetta sekä huomioida sisäolosuhteet. (Equa 2023a.)

Sisäilmasto-olosuhteiden muutoksia ja kysyntäjoustopotentialia asuinkerrostalon maalämpöjärjestelmässä tutkitaan simuloimalla case-asuinkerrostalon lämmitysenergian kulutus sekä sisäilmasto-olosuhteet tuntitasolla vuoden ajalle. Tuntitason simulointia käytetään sisäilmastovaatimuksien vuoksi, koska sisäolosuhteita arvioidaan tuntikohtaisen pysyvyyden perusteella. Lämmitysenergian simuloinnin avulla tutkitaan maalämpöjärjestelmän sähkötehon kysyntäjoustopotentialia sekä saatavuutta vuoden aikana. Vaikutuksia sisäilmasto-olosuhteisiin tutkitaan simuloimalla tilalämmityksen pysäytys lämmitystarpeen ollessa suurimmillaan. Simuloinnin avulla tutkitaan kuinka kauan lämmitysjärjestelmä voi joutua ilman, että asuintilojen sisäolosuhteet merkittävästi huonontuvat, jotta saadaan reunaehdot kysyntäjoustopotentialin maksimipituudelle. Lisäksi simuloidaan valitun kysyntäjoustopotentialin vaikutuksia sisäolosuhteisiin sekä lämmitystehtoon ja energiakulutukseen. Simuloinnilla tutkitaan kuinka nopeasti sisäilmasto-olosuhteet muuttuvat eri kysyntäjoustopotentialiteissa ja onko kysyntäjoustopotentialilla vaikutusta asuinkerrostalon energiakulutukseen. Simulointien tavoitteena on selvittää miten kysyntäjoustopotentialin vaikutus energiakulutukseen, tehoon ja sisäolosuhteisiin. Kaikki simuloinnit suoritetaan tuntitason tarkkuudella.

Sisälämpötilaa arvioidaan operatiivisen lämpötilan avulla, koska operatiivinen sisälämpötila huomioi ympäröivien pintojen säteilylämpötilat ja pintojen kylmenemisen aiheuttaman vaikutuksen. Pinnat saattavat viilentyä kysyntäjoustopotentialin aikana, koska lämmitys on seis ja rakenteet luovuttavat energiaa ympäristöön.

Lämpimän käyttöveden lämmitystarve sekä ilmanvaihdon lämmitystarve rajataan simuloinneista ulos. Simuloinneissa tarkastellaan ainoastaan tilalämmityksen pysäytysmahdollisuuksia ja sen vaikutuksia.

## 6.1 Simulointien kulku

Simuloinnit aloitettiin mallintamalla case-asuinkerrostalo IDA-ICE- simulointiohjelmaan. Case-asuinkerrostalon lämmityksen teho- ja energiakulutus sekä sisäolosuhteet simuloitiin yhden vuoden ajalle tunnin tarkkuudella ilman kysyntäjouaston toteuttamista.

Vaikutuksia sisäolosuhteisiin simuloitiin pysäyttämällä tilalämmitys lämmitystehotarpeen ollessa korkeimmillaan ja simulointituloksien perusteella selvitettiin aikaraami, minkä sisällä kysyntäjousto pystytään toteuttamaan heikentämättä sisäolosuhteita. Suurin lämmitystehotarpeen ajankohta löydettiin case-asuinkerrostalon simuloinnin tuloksista.

Sen jälkeen simulointeja jatkettiin niin, että kysyntäjoustoajankohdat ajoitettiin sähkön päiväkuormituskäyrää mukaillen kulutuksen huippuhetkille aamulle sekä iltapäivälle. Simuloinneissa oletettiin, että sähkön käytön huippuhetket ja korkeimmat SPOT-hinnat ajoittuvat vuoden jokaisena päivänä klo 7-10 sekä klo 16-19 välille, jolloin tilalämmitys pysäytettiin. Kysyntäjoustosimuloinneista tehtiin 2 eri mallia, joissa toisessa tilalämmitys pysäytettiin aamun ja iltapäivän huippuhetkien ajaksi (6h kysyntäjoustostrategia) ja toisessa tilalämmitys pysäytettiin aamun huippuhetkien ajaksi (3h kysyntäjoustostrategia).

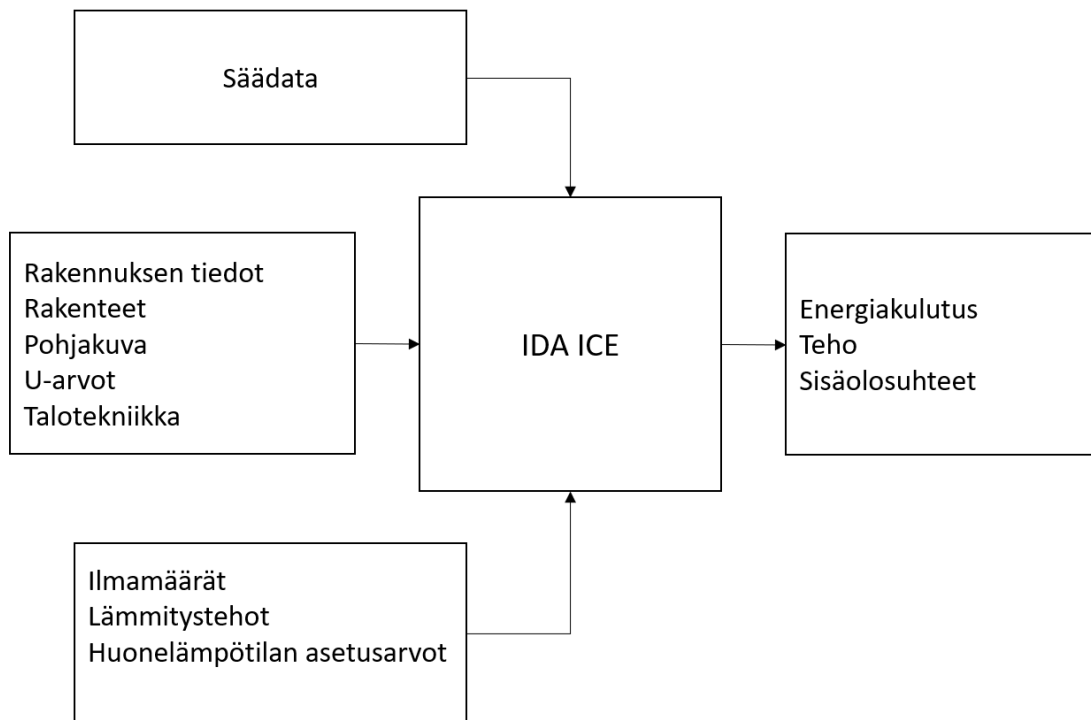
Kysyntäjoustopilanteiden simulointituloksia verrattiin tilanteeseen ilman kysyntäjoustoja ja arvioitiin sen avulla kysyntäjouaston vaikutuksia. Kaikissa kysyntäjoustosimuloinneissa tutkittiin lämmitysjärjestelmän maksimaalista joustoja pysäyttämällä tilalämmitys kokonaan kysyntäjouaston ajaksi.

Simuloinneissa tutkittiin lämmityksen pysäyttämistä eli kysyntäjouaston näkökulmasta tehoa leikataan sekä siirretään eri ajankohtaan ja reservimarkkinoiden näkökulmasta joustetaan ylöspäin eli vähennetään kuormaa.

### 6.1.1 Simulointiohjelmisto

Tämän tutkimuksen simuloinnit suoritettiin Ida Indoor Climate and Energy (IDA ICE) simulointiohjelmistolla. Simulointiohjelmisto on validoitu useissa tutkimuksissa (Equa 2023b), joten se antaa hyvän perustelun käyttää kyseistä ohjelmistoa tässä tutkimuksessa ja tulosten analysoinnissa. IDA ICE- ohjelmiston käyttämät simulointimallit perustuvat matemaattisiin laskentayhtälöihin ja ne on kuvattu *Models for Building Indoor Climate and Energy Simulatio-* julkaisussa (IEA 1999). Sahlin (1996) on tutkinut simulointiohjelmiston suunnittelua ja ohjelmiston käyttämiä laskentamalleja tarkemmin väitöskirjassaan *Modelling and simulation methods for modular continuous systems in buildings*, missä on avattu tarkemmin ohjelmiston käyttämät laskentaratkaisumallit, yhtälöpohjaiset mallinkuvauskielet ym. (Sahlin, P. 1996).

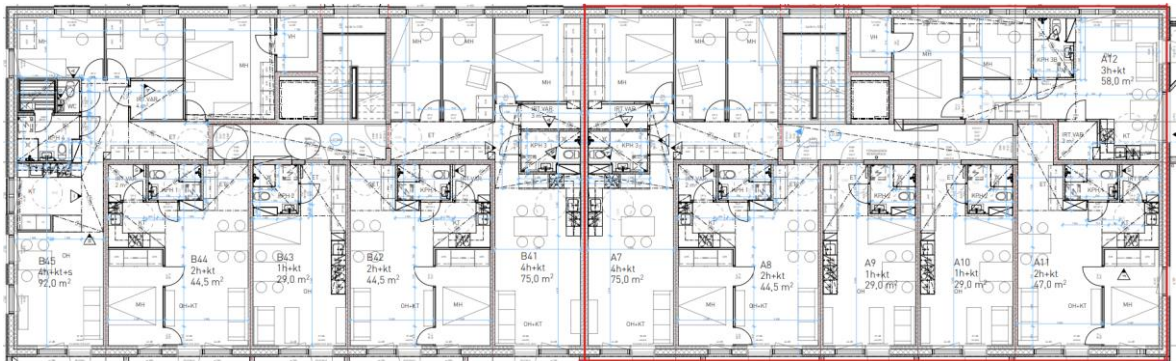
Tutkimuksen laskennallinen järjestely on esitetty kuvassa 14. IDA ICE-ohjelmistoon syötetään lähtöarvot rakennuksen tiedoista, U-arvoista, säädätystä jne. ja lopuksi ohjelmisto tuottaa tavoiteltuja tuloksia mukaan lukien energiakulutus, teho ja sisäolosuhteet.



Kuva 14. Tutkimuksen laskennallinen järjestely.

### 6.1.2 Case-asuinkerrostalon mallintaminen

Simulointien toteutusta varten mallinnettiin IDA ICE- simulointiympäristöön case-asuinkerrostalo hyödyntämällä Vantaalle vuonna 2022 valmistuneen asuinkerrostalon pohjakuvia ja julkisivuleikkauksia. Asuinrakennuksessa on 6 asuinkerrosta, 72 huoneistoa ja asuinhuoneistoneliöitä on yhteensä 3390 m<sup>2</sup>. Asuintilojen huonekorkeus on 2,6 metriä ja välipohjan paksuus on 0,4 metriä sisältäen välipohjalaatan ja pintavalun. Rakennuksesta mallinnettiin vain asuintilat ja 7. kerroksen konehuonetilat on jätetty mallintamatta. Tutkimuksessa verrataan kysyntäjoustopotentialia tilanteeseen ilman kysyntäjoustopotentialia, joten tuloksissa päästään riittävään tarkkuuteen, vaikka teknisiä tiloja ei mallinneta. Lisäksi teknisten tilojen lämmitystarve on vähäisempää kuin asuintilojen mm. alhaisemman sisälämpötilan asetusarvon vuoksi, joten kysyntäjoustopotentialin selvittämisen osalta päästään tässä työssä riittävään tarkkuuteen vaikka teknisten tilojen lämmitys on rajattu ulos simuloinneista. Rakennuksen pohjakuvat, tilajaot ja ilmansuunnat on määritelty arkkitehtipiirustuksien mukaisesti IDA ICE- ohjelmistoon. Rakennuksen pohjakuva on esitetty kuvassa 15.

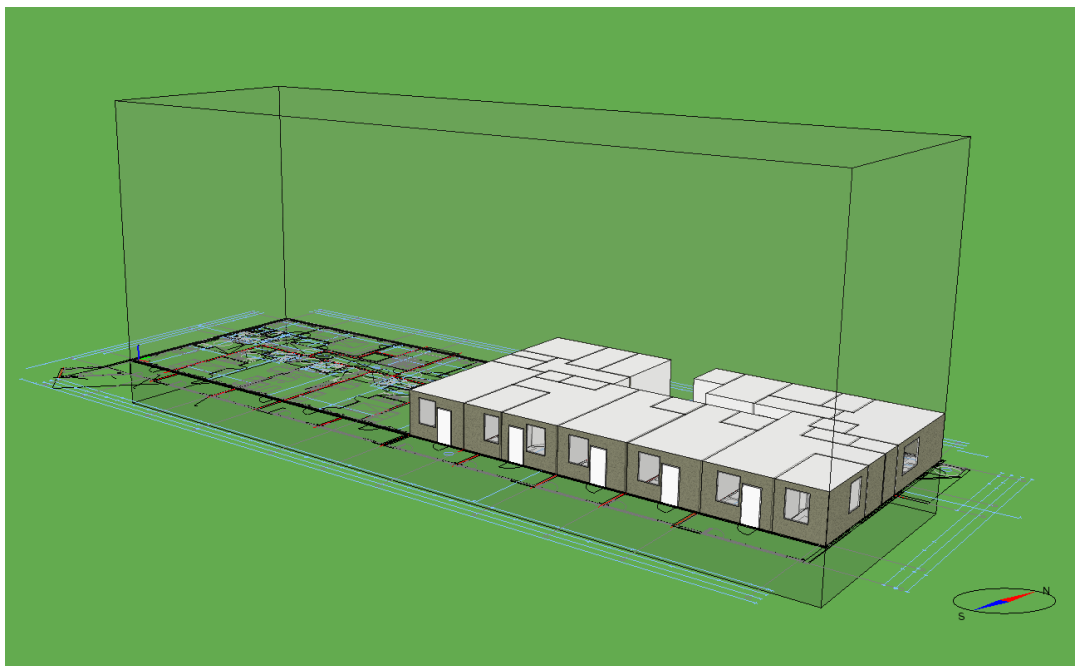


Kuva 15. Rakennuksen 2-kerroksen pohjapiirros. Punaisella rajattu A-porras, mikä on mallinnettu simulointiohjelmistoon. Kuvan alaosassa sijaitsevat huoneistot suuntautuvat etelään.

Mallinnetun rakennuksen U-arvot ja rakennetyypit on valittu IDA ICE- ohjelmiston valmiin mallin *FINYMa1010Asuinkerrostalo* mukaisesti. Mallinnetun rakennuksen rakennetyypit ja U-arvot vastaavat Suomen rakentamismääräyksien minimivaatimuksia. Rakennuksen ulkoseinät ja rakenteet ovat betonia. Käyttöasteet, häviöt, kylmäsiilat ja lämpökuormat

vastaavat energialaskennan lähtötietojen oletusasetusarvoja, jotka sisältyvät IDA ICE-ohjelmiston valmiin mallin *FINYMa1010Asuinkerrostalo* oletusasetuksiin. Rakennetyypit sekä energialaskennan lähtötietoarvot löytyvät valmiina mallina IDA ICE-ohjelmiston kirjastosta, eikä lähtötietoja ole muutettu IDA ICE-ohjelmiston oletusasetusarvoista. Toistamalla tutkimus simulointiohjelman *FINYMa1010Asuinkerrostalo* valmiilla mallilla saadaan vastaavat lähtöarvot rakenteiden U-arvoille, rakennetyypeille, käyttöasteille ja lämpöhäviöille kuin tutkimuksessa on käytetty. U-arvot, rakennetyypit ja käyttöasteet on esitetty tarkemmin liitteessä 1.

Koko rakennusta, eikä jokaista asuntoa tai yhteistiloja ole mallinnettu simulointiohjelmistoon, koska työn tavoitteen kannalta ei ole tarkoituksenmukaista mallintaa jokaista tilaa detajikohtaisesti simulointiympäristöön. Rakennuksesta on mallinnettu A-portaan 2. kerroksen asunnot ja työn tavoitteen kannalta päästään riittävään tarkkuuteen monistamalla A-portaan mallinnettujen tilojen simulointituloksia siten, että lasketaan mallinnettujen tilojen tulokset per asuinhuoneistoneliö ja suhteutetaan tulokset vastaamaan koko rakennuksen asuinhuoneistoneliötä. Mallinnettujen tilojen neliöt on esitetty taulukossa 6 ja tilat sekä tilojen sijoittuminen rakennuksen rungon suhteen on esitetty kuvassa 16.



Kuva 16. Mallinnetut vyöhykkeet IDA ICE-ohjelmistossa. Rakennuksen ulkovaippa näkyy ääriiviivoina.

Mallinnettujen tilojen tiedot ja neliöt on esitetty taulukossa 6. Jokainen huone on mallinnettu omana vyöhykkeenään, jotta nähdään mahdolliset ilmansuunnan tai ulkoseinien vastaisten seinien aiheuttamat erot huoneiden välillä.

Taulukko 6. Mallinnetun asuinkerrostalon asuntotyypit ja neliöt.

A-porras, 2. kerros	Tilatyypit	Asuinneliöt
Asunto 1	4h+kt	75 m <sup>2</sup>
Asunto 2	2h+kt	44,5 m <sup>2</sup>
Asunto 3	1h+kt	29 m <sup>2</sup>
Asunto 4	1h+kt	29 m <sup>2</sup>
Asunto 5	2h+kt	47 m <sup>2</sup>
Asunto 6	3h+kt	58 m <sup>2</sup>
		282,5 m <sup>2</sup>

Mallinnettujen asuntojen viereisissä tiloissa oletetaan olevan samanlaiset olosuhteet kuin mallinnetuissa tiloissa, joten lämmönsiirtymistä tilojen välillä ei oteta huomioon pl. ulkotilaa vasten olevat rakenteet. Todellisessa rakennuksessa on A- ja B-raput ja rakennuksessa on 6 asuinkerrosta. Todellisen rakennuksen huoneistotyypit, neliöt ja pohjakuvat ovat identtiset 1-6. kerrosten välillä. Diplomityön kannalta ei ole oleellista mallintaa jokaista eri tilaa detajikohtaisesti simulointiohjelmistoon vaan tavoitteena on simuloida tilanne ilman kysyntäjoustoja, johon eri kysyntäjoustostrategioiden vaikutuksia verrataan ja tällä saavutetaan riittävä tarkkuustaso tulosten analysointia varten. Mallinnetun alueen simulointitulokset suhteutetaan asuinhuoneistoneliöihin ja tulokset monistetaan vastaamaan koko rakennuksen asuinhuoneistoneliöitä, jotta tuloksiin saadaan mukaan kaikki rakennuksen huoneistot ja tulokset vastaavat koko asuinkerrostalon tuloksia. Taulukossa 7 on esitetty rakennuksen kaikki huoneistot ja pinta-alat.



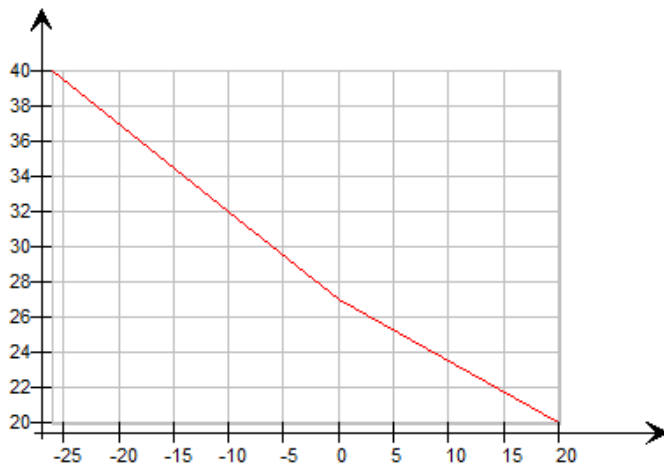
Taulukko 7. Mallinnetun asuinkerrostalon asuntotyypit ja neliöt. Kaikki asunnot yhteensä.

A-ja B-porras, 1-6. kerrokset	Yhteensä asuntoja	Tilatyypit	Asuinneliöt
Asunto 1	12	4h+kt	900 m <sup>2</sup>
Asunto 2	12	2h+kt	534 m <sup>2</sup>
Asunto 3	12	1h+kt	348 m <sup>2</sup>
Asunto 4	12	1h+kt	348 m <sup>2</sup>
Asunto 5	12	2h+kt	564 m <sup>2</sup>
Asunto 6	12	3h+kt	696 m <sup>2</sup>
	72		3390 m <sup>2</sup>

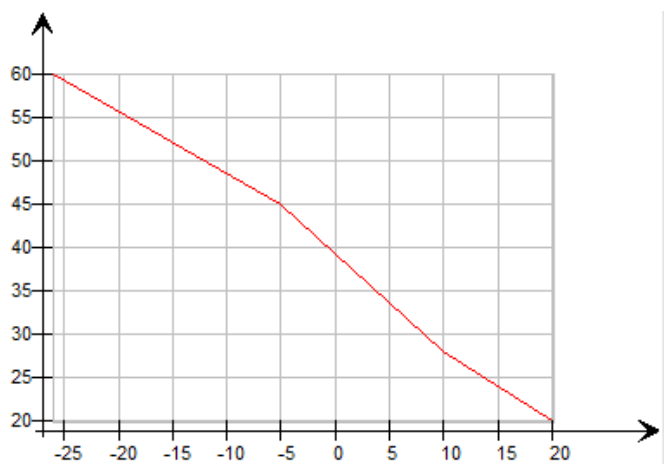
Ilmamäärät ja huoneiden lämmitystekot vastaavat todellisen asuinkerrostalon mitoitus tietoja. Tuloilmanvaihdon määrä mallinnetuissa tiloissa on yhteensä 0,55 l/s/m<sup>2</sup> ja poistoilmanvaihdon määrä on yhteensä 0,58 l/s/m<sup>2</sup>. Tilälämmitystekko mallinnetuissa tiloissa on yhteensä 18,1 W/m<sup>2</sup>. Ilmanvaihtokoneet ovat huoneistokohtaisia ja niiden lämmitys tuotetaan suorasähkölämmityksellä eli ilmanvaihdon lämmitysenergiaa ei tuoteta maalämpöjärjestelmällä. Ilmanvaihdon ilmamäärä ja sisäänpuhalluslämpötila pidetään vakiona 18 °C, jotta ilmanvaihdon mahdolliset vaikutukset olisivat vakiot simulointien tuloksissa. Ilmanvaihtokoneita, lämmönjakelujärjestelmää eikä lämmöntuotantojärjestelmää ole tyypitetty erikseen vaan simuloinneissa käytettiin IDA ICE- ohjelmiston valmiita oletuslaitteita ja niiden ominaisuuksia, mitkä löytyvät simulointiohjelman valmiista mallikirjastosta *FINYMa1010Asuinkerrostalo*.

Simulointeja varten rakennettiin kaksi identtistä simulointimallia, joista toiseen asetettiin lämmönjakelujärjestelmäksi lattialämmitys ja toiseen vesikiertoinen patterilämmitys, jotta tuloksissa päästään vertailemaan vaikuttaako lattialämmityksen varaava ominaisuus tuloksiin. Lämmönjakelujärjestelmien menoveden säätökäyrät on esitetty kuvissa 17 ja 18. Lämmitysjärjestelmänä on molemmissa lämmönjakelujärjestelmissä maalämpö. Lattialämmityskohteessa maalämmön COP-kertoimena käytetään vakioarvoa 3,7. Patterilämmityskohteessa COP-kertoimena käytetään vakioarvoa 3. COP-arvo vaihtelee todellisuudessa lämpötilatasojen mukaan, mutta simuloinnissa saavutetaan riittävä tarkkuus vakio COP-arvolla, koska tuloksia verrataan aina tilanteeseen ilman kysyntäjoustoja, missä on samat lähtöarvot ja mitoitus tiedot kuin kysyntäjousto simuloinneissa. Lämpöpumpulle ei ole laskettu nimellistehoa, eikä maksimitehoa ole rajoitettu vaan lämpöpumppu saa niin paljon sähkötehoa kuin tilälämmitys vaatii eli maalämpöjärjestelmän lämpöpumpun teho- ja

energiapetto on 100 %. Lämmöntuotanto on aina päällä pl. kysyntäjoustoprojektointien poikkeukset. Nimellislämmitystehot lasketaan sisälämpötilan asetusarvossa 21 °C. Lattialämmityksen lämpötilaero meno- ja paluuvien välillä on 5 °C mitoitusarvossa. Patterilämmityksen lämpötilaero meno- ja paluuvien välillä on 30 °C mitoitusarvossa.



Kuva 17. Lattialämmitysverkoston menovesikäyrä. Y-akselilla menoveden lämpötila (°C) ja x-akselilla ulkolämpötila (°C).



Kuva 18. Patteriverkoston menovesikäyrä. Y-akselilla menoveden lämpötila (°C) ja x-akselilla ulkolämpötila (°C).

Säätiedostona käytetään Helsingin testivuosi 2012 versiota (TRY2012), mikä löytyy valmiiksi IDA IDE- ohjelmiston kirjastosta ja joka perustuu Ilmatieteen laitoksen energialaskennalle laadittuihin todellisiin säätietoihin vuosilta 1980-2009.

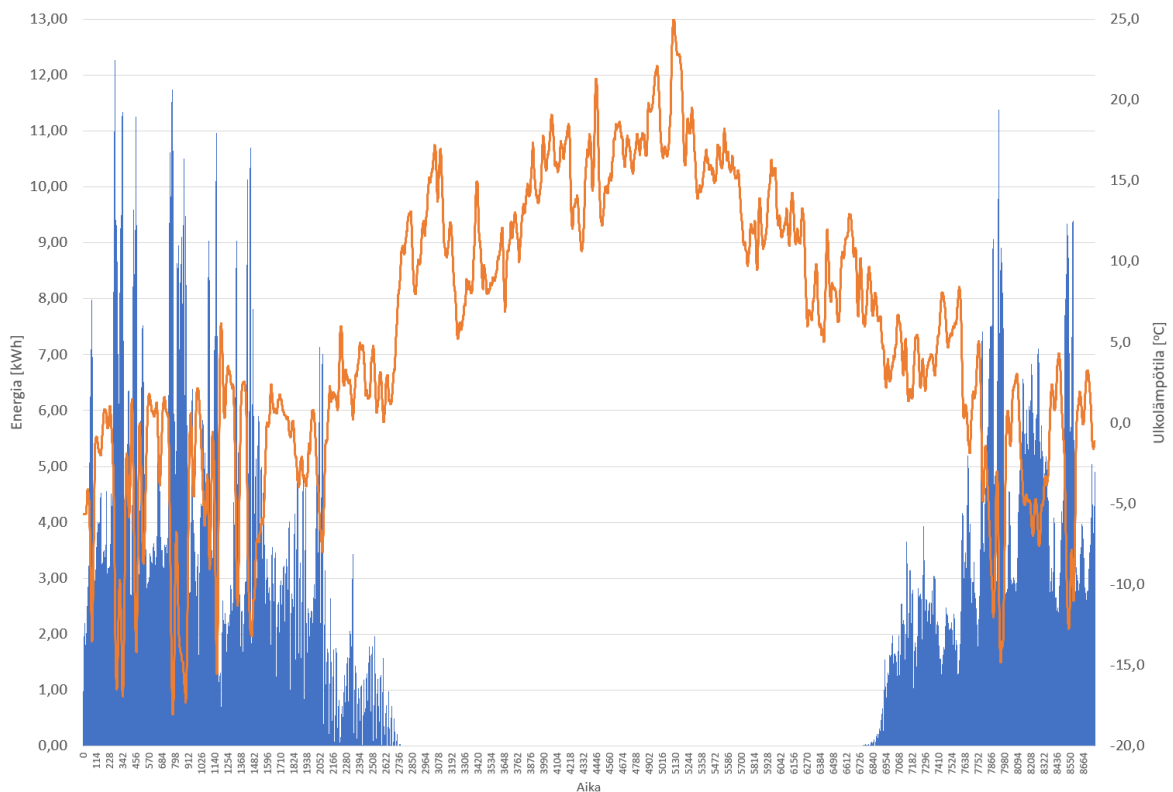
Mallinnettujen huoneiden lämpötilan asetusarvoiksi aseteltiin 21 °C ja sallittu poikkeama +/- 1 °C, joten simulointiohjelmisto pyrkii pitämään huoneiden lämpötilan ko. arvon sisällä joka tilanteessa. Huonetilan lämmitystehoa säädetään huoneen lämpötilan mukaan.

## 6.2 Kysyntäjouaston potentiaali

Asuinkerrostalon maalämpöjärjestelmän kysyntäjouaston potentiaalia arvioidaan case-asuinkerrostalon simuloinnin avulla. Case-asuinkerrostalon maalämpöjärjestelmän tilalämmitykseen kuluva sähköenergia simuloitiin tuntitasolla vuoden ajanjaksolla. Simuloinnilla selvitetään maalämpöjärjestelmän sähköenergian käyttö tuntitasolla, jonka avulla arvioidaan kysyntäjoustopotentiaalia vuoden aikana.

### 6.2.1 Lattialämmitysrakennus

Lattialämmitteisen case-asuinkerrostalon lämmitysenergiaan kuluva maalämpösähkön kulutus vuositasolla on esitetty kuvassa 19. Simuloitu lämmitysenergian kulutus kuvaa maalämpöjärjestelmän sähkön kulutusta, mikä tarvitaan tuottamaan tarvittava tilalämmityksen energia.

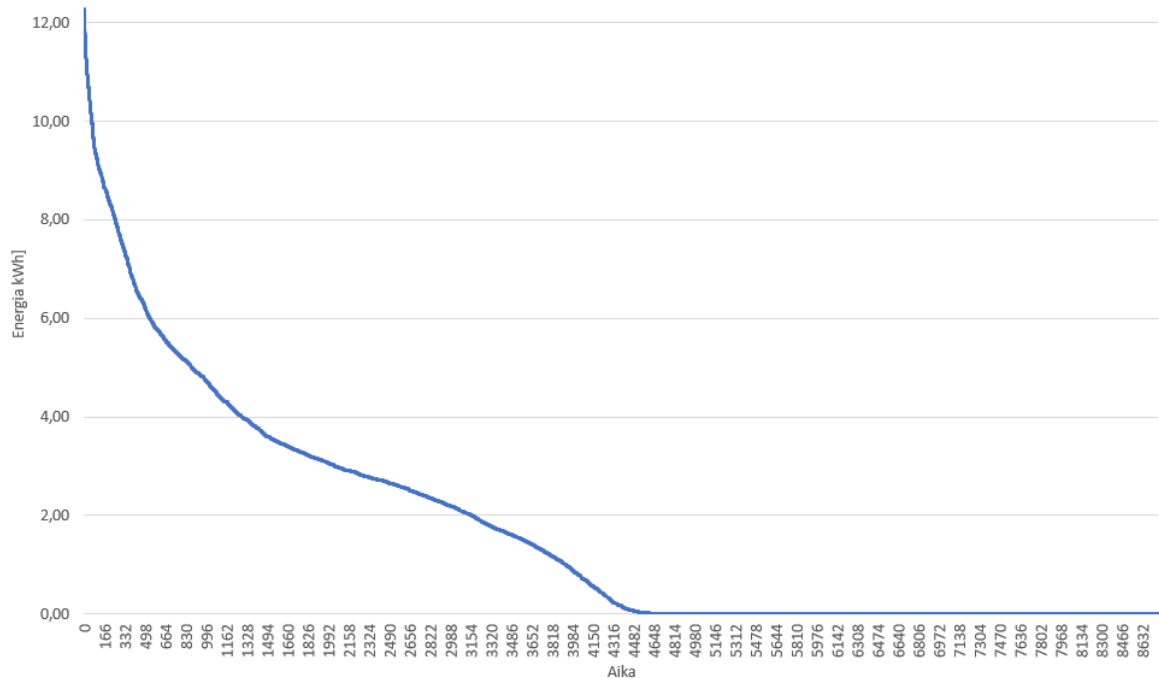


Kuva 19. Case-asuinkerrostalon lämmitysenergian kulutus tuntitasolla vuoden ajanjaksolla. Y-akselilla aika tunteina, vasemmanpuoleisessa x-akselilla maalämpöjärjestelmän sähkönkulutus tuntitasolla [kWh] ja oikeanpuoleisessa x-akselilla ulkolämpötila [°C]. Lämmitysenergian kulutus on kuvattu sinisellä värillä ja ulkolämpötila oranssilla värillä.

Simuloinnin tuloksista nähdään, että kysyntäjoustopotentialiaali painottuu niille ajankohdille, kun ulkolämpötila on alle 0 °C. Keskimääräinen maalämpöjärjestelmän sähköenergian kulutus on noin 3 – 4 kWh, kun rakennuksessa on lämmitystarvetta. Sähköenergian kulutus on korkeimmillaan kovilla pakkasilla, jolloin sähköenergian kulutus on noin 12 kWh ulkolämpötilan ollessa noin -15 °C. Sähköenergian kulutus on tunnin aikainen sähkönkulutus, joten todellisuudessa maalämpöjärjestelmän yhden tunnin aikana käyttämä sähköteho voi olla hetkittäin korkeampi kuin tuloksissa esitetyt tunnin aikaiset kulutukset. Todellisessa tilanteessa COP-arvo huononee, kun lämpötila kasvaa, joten potentialiaali voi todellisuudessa olla hieman suurempi kylmemmillä keleillä, kun lämmitysverkostoissa tarvitaan lämpimämpää menovettä.

Kuvassa 20 on esitetty maalämpöjärjestelmän sähkön kulutuksen pysyvyysskäyrä vuoden ajalle. Pysyvyysskäyrää lukemalla nähdään, että noin puolet vuoden tunteista

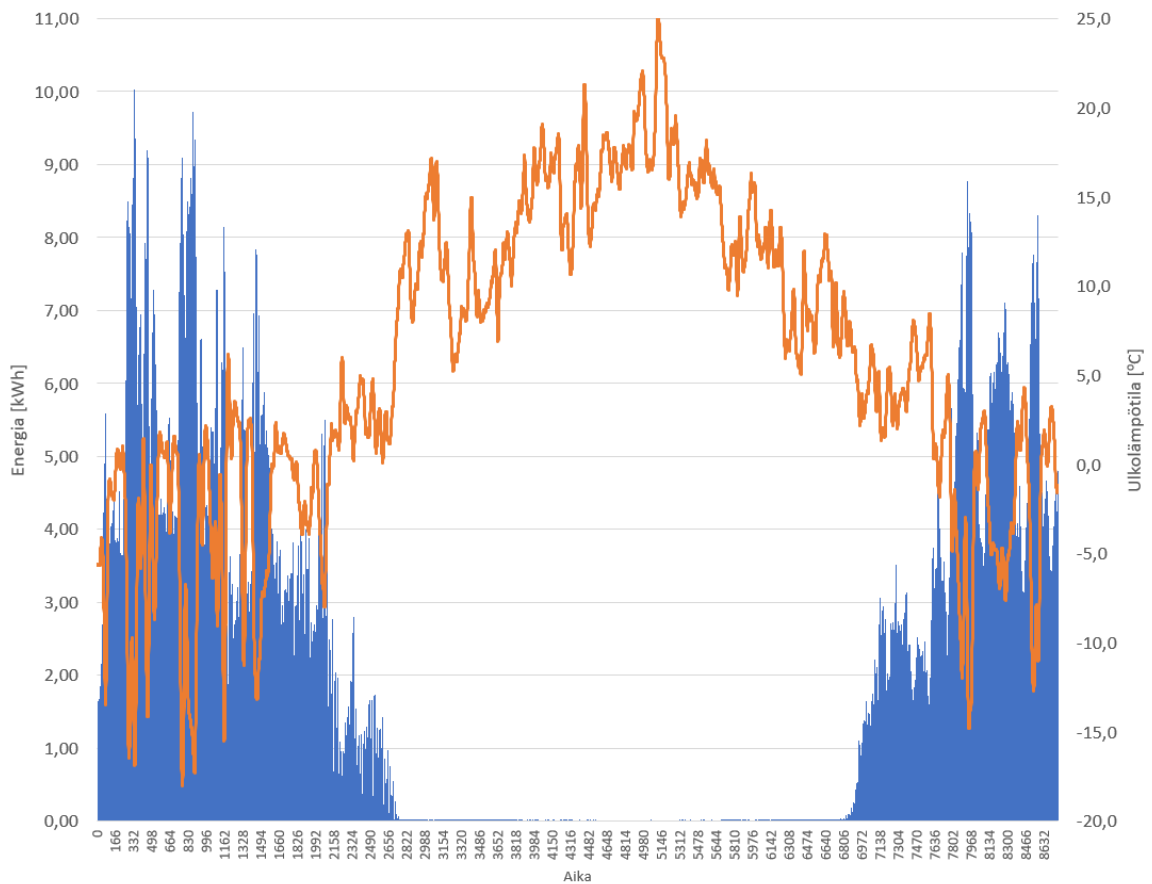
maalämpöjärjestelmä ei käy lämmitystä varten, jolloin kysyntäjoustoa ei voida myöskään tehdä kuin ainoastaan lisäämällä kulutusta.



Kuva 20. Case-asuinkerrostalon lämmitysenergian sähkön kulutuksen pysyvyyskäyrä tuntitasolla vuoden ajanjaksolla. Y-akselilla aika tunteina ja x-akselilla maalämpöjärjestelmän sähkönkulutus tuntitasolla [kWh].

### 6.2.2 Patterilämmitysrakennus

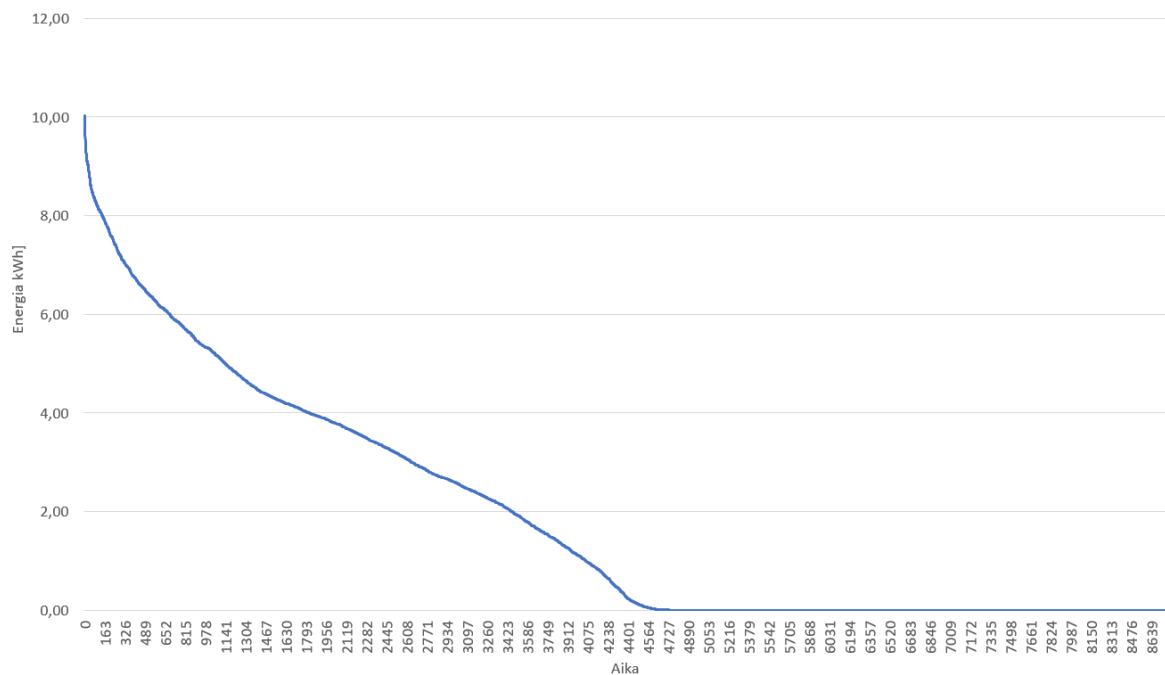
Patterilämmitteisen case-asuinkerrostalon lämmitysenergiaan kuluva maalämpösähkön kulutus vuositasolla on esitetty kuvassa 21. Simuloitu lämmitysenergian kulutus kuvaa maalämpöjärjestelmän sähkön kulutusta, mikä tarvitaan tuottamaan tarvittava tilalämmityksen energia.



Kuva 21. Case-asuinkerrostalon lämmitysenergian kulutus tuntitasolla vuoden ajanjaksolla. Y-akselilla aika tunteina, vasemmanpuoleisessa x-akselilla maalämpöjärjestelmän sähkönkulutus tuntitasolla [kWh] ja oikeanpuoleisessa x-akselilla ulkolämpötila [°C]. Lämmitysenergian kulutus on kuvattu sinisellä värillä ja ulkolämpötila oranssilla värillä.

Simuloinnin tuloksista nähdään, että kysyntäjoustopotentiaali painottuu pääsääntöisesti niille ajankohdille, kun ulkolämpötila on alle 5 °C. Keskimääräinen maalämpöjärjestelmän sähköenergian kulutus on noin 3 – 4 kWh, kun rakennuksessa on lämmitystarvetta. Sähköenergian kulutus on korkeimmillaan kovilla pakkasilla, jolloin sähköenergian kulutus on noin 10 kWh ulkolämpötilan ollessa noin -15 °C. Sähköenergian kulutus on tunnin aikainen sähkönkulutus, joten todellisuudessa maalämpöjärjestelmän yhden tunnin aikana käyttämä sähköteho voi olla hetkittäin korkeampi kuin tuloksissa esitetyt tunnin aikaiset kulutukset. Todellisessa tilanteessa COP-arvo huononee, kun lämpötila kasvaa, joten potentiaali voi todellisuudessa olla hieman isompi kylmemmillä keleillä, kun lämmitysverkostoissa tarvitaan lämpimämpää menovettä.

Kuvassa 22 on esitetty maalämpöjärjestelmän sähkön kulutuksen pysyvyyskäyrä vuoden ajalle. Pysyvyyskäyrää lukemalla nähdään, että noin puolet vuoden tunteista maalämpöjärjestelmä ei käy lämmitystä varten, jolloin kysyntäjousto ei voida myöskään tehdä kuin ainoastaan lisäämällä kulutusta.



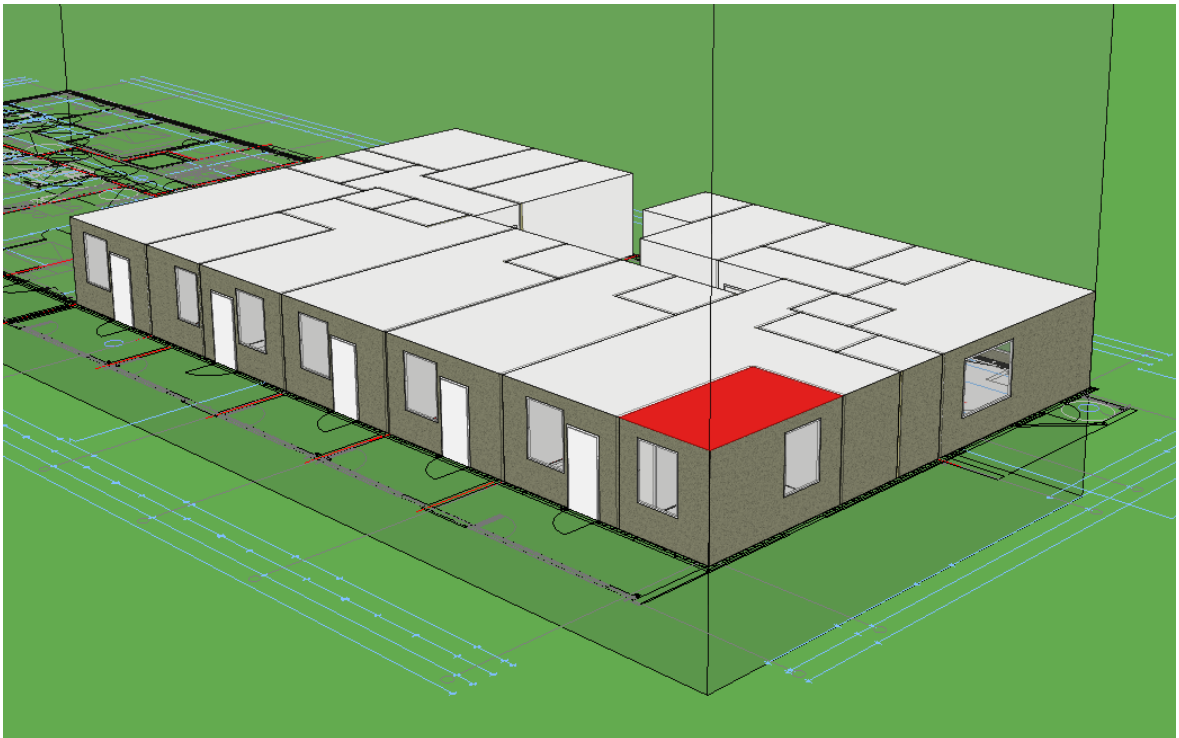
Kuva 22. Case-asuinkerrostalon lämmitysenergian sähkön kulutuksen pysyvyyskäyrä tuntitasolla vuoden ajanjaksolla. Y-akselilla aika tunteina ja x-akselilla maalämpöjärjestelmän sähkönkulutus tuntitasolla [kWh].

### 6.3 Vaikutukset sisäolosuhteisiin

Kysyntäjouston vaikutuksia sisäolosuhteisiin arvioitiin case-asuinkerrostalon olosuhdesimuloinnin avulla. Kysyntäjouston ajallista pituutta ja olosuhdevaikutuksia simuloitiin pysäyttämällä rakennuksen lämmitysjärjestelmä. Ajankohdaksi valikoitui ajanjakso, jolloin case-asuinkerrostalon lämmitystehontarve oli korkeimmillaan, jotta nähdään kuinka nopeasti sisäolosuhteet muuttuvat tehontarpeen ollessa suurimmillaan. Simulointijakson aikainen lämmitystehontarve oli suurimmillaan tammikuussa 15. päivänä, joten sisäolosuhdevaikutuksia simuloitiin ko. päivänä. Simulointijakso on tammikuu, jolloin lämmitysjärjestelmä on normaalisti päällä, mutta 15. päivänä lämmitysjärjestelmä

pysäytettiin klo 11 – 23, jonka jälkeen lämmitysjärjestelmä palautettiin välittömästi takaisin normaaliin tilaan. Simuloinnilla selvitettiin kuinka kauan lämmitysjärjestelmä voi joustaa ilman, että sisäolosuhteet merkittävästi huonontuvat. Simuloinnit suoritettiin IDA ICE-simulointiohjelman *Heating load*-simulaatiolla, mikä on tarkempi olosuhteiden simulointia varten ja näyttää tuloksena maksimaalisen tehon ja huonelämpötilan maksimilämmitystehon aikana.

Sekä lattialämmitteisessä että vesikiertoisella patterilämmityksellä varustetussa case-asuinkerrostalossa viilein tila lämmityksen pysäyttämisen aikana oli asunnon nro 5 makuuhuone. Kyseinen makuuhuone sijoittuu kahta ulkoseinää vasten ja makuuhuoneen sijoittuminen rakennusrunkoon nähden on esitetty kuvassa 23.



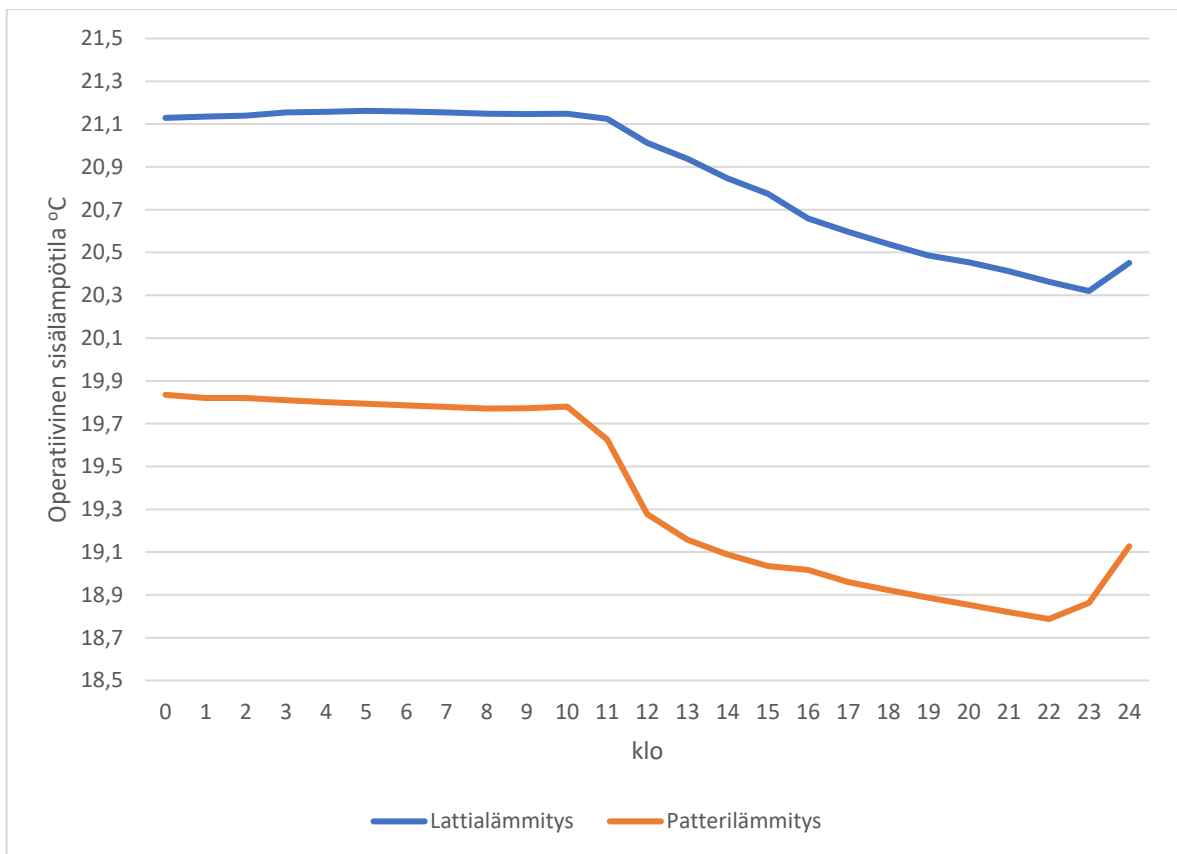
Kuva 23. Case-asuinkerrostalon lämmityksen pysäytys. Viilein tila lämmityksen pysäyttämisen aikana on asunnon nro 5 makuuhuone.

Lattialämmitteisen case-asuinkerrostalon makuuhuoneen operatiivinen sisälämpötila oli ennen lämmityksen pysäyttämistä noin 21,1 °C ja ulkoilma noin -15 °C. Kuvasta 24 nähdään, että operatiivinen sisälämpötila ei laske yli yhden celsiusasteen verran lämmityksen pysäyttämisen aikana ja operatiivinen sisälämpötila pysyy lämmityksen pysäytyksen ajan yli 20 °C. Lämmityksen palattua normaaliin klo 23 operatiivinen



sisälämpötila oli noin 20,3 °C ja ulkolämpötila -10 °C. Operatiivinen sisälämpötila laskee yhteensä noin 0,8 °C lämmityksen ollessa seis ja lämpötilan lasku on loivaa.

Vesikiertoisella patterilämmityksellä varustetun case-asuinkerrostalon viilein tila lämmityksen pysäyttämisen aikana oli myös asunnon nro 5 makuuhuone. Makuuhuoneen operatiivinen sisälämpötila oli ennen lämmityksen pysäyttämistä noin 19,8 °C ja ulkoilma noin -15 °C. Kuvasta 24 nähdään, että operatiivinen sisälämpötila laskee jyrkästi heti lämmityksen pysäytyksen jälkeen, mutta lämpötilan lasku loivenee noin kahden tunnin kuluessa pysäytystilasta. Operatiivinen sisälämpötila laskee noin 1 °C:n lämmityksen ollessa seis. Lämmityksen palattua normaaliin klo 23 operatiivinen sisälämpötila oli 18,9 °C ja ulkolämpötila -10 °C.



Kuva 24. Case-asuinkerrostalon lämmityksen pysäytys. Asunnon nro 5 makuuhuoneen operatiivinen sisälämpötila lämmityksen pysäytyksen aikana. Y-akselilla operatiivinen sisälämpötila [°C] ja x-akselilla kellonaika.

Lattialämmitteisen asuinkerrostalon operatiivisen sisälämpötilan muutos on tuloksien perusteella hitaampaa ja loivempaa kuin patterilämmitteisessä asuinkerrostalossa, mikä voi johtua siitä, että lattialämmitys varaa lämpöä enemmän lattiarakenteeseen kun taas vesikiertoinen patteri lämmittää suoraan huoneilmaa.

#### 6.4 Vaikutukset lämmitystehoon ja energiakulutukseen

Asuinkerrostalon maalämpöjärjestelmän kysyntäjoustopuolteen vaikutuksia lämmitystehoon ja energiankulutukseen arvioitiin simuloimalla case-asuinkerrostalon lämmitystehoa ja lämmitysenergiakulutusta kysyntäjoustopuolteen strategioilla.

Kysyntäjoustopuolteen strategiana valittiin lämmityksen pysäyttäminen sähkön päiväkuormituskäyrän mukaisesti korkeimman kulutuksen tunneilla aamulla ja illalla. Simuloinnissa oletettiin, että korkeimmat kulutuksen hetket ovat joka päivä klo 7-10 ja 16-19. Lämmitys pysäytetään aamulla klo 7-10 väliseksi ajaksi ja ilta-aikana klo 16-19 väliseksi ajaksi. Pisin yhtäaikaista joustoaikaa on 3 tuntia, mikä ei pitäisi olosuhdesimulointien tulosten perusteella vaikuttaa sisäolosuhteisiin heikentävästi. Lämmitys pysäytetään välittömästi kysyntäjoustopuolteen alkaessa ja palautetaan välittömästi takaisin normaaliin kysyntäjoustopuolteen päättyessä. Lisäksi tehdään toinen kysyntäjoustopuolteen strategia samoilla ehdoilla kuin ensimmäinen strategia, mutta lämmitys pysäytetään vain aamulla klo 7-10 välisenä aikana ja muutoin lämmitys on normaalisti käytössä. Kysyntäjoustopuolteen toteutetaan simuloinneissa vuoden jokaisena päivänä. Lisäksi tarkastellaan kysyntäjoustopuolteen vaikutuksia operatiiviseen sisälämpötilaan. Maalämpöjärjestelmä tuottaa lämpöenergian ainoastaan tilalämmitykseen. Ilmanvaihtokoneiden ja lämpimän käyttöveden tarvitsema lämmitysenergia on mittaroitu erikseen ja ne eivät sisälly maalämpöjärjestelmän sähkön kulutuksen mittaukseen. Simuloinnit suoritettiin IDA ICE-simulointiohjelman *Energy*-simulaatiolla, mikä on hieman nopeampi ja suoraviivaisempi simulointi ja mikä sopii paremmin energiakulutuksen simulointiin.

##### 6.4.1 Lattialämmitysrakennus

Kysyntäjoustopuolteen tulokset on esitetty taulukoissa 8 ja 9. Tuloksia verrataan tilanteeseen ilman kysyntäjoustopuolteen. Alin sisälämpötila jokaisessa tilanteessa käytön aikana

esiintyy asunnon 5 makuhuoneessa. Kysyntäjoustop aikainen alin sisälämpötila poikkeaa 6 h joustostrategialla noin 0,4 °C tilanteesta ilman kysyntäjoustop. Maalämpöjärjestelmän vuotuinen sähkön kulutus laskee 6 h joustostrategialla noin 0,47 MWh eli noin 470 kWh verrattuna tilanteeseen ilman kysyntäjoustop. Maalämpöjärjestelmän korkein tehontarve kasvaa 6 h jouston aikana noin 5,5 kW verrattuna tilanteeseen ilman kysyntäjoustop, mutta kysyntäjoustop aikana maalämpöjärjestelmän sähkötehotarve tippuu suurimmillaan 8 kW verrattuna tilanteeseen ilman kysyntäjoustop. Tuloksien perusteella valittu kysyntäjoustopstrategia vaikuttaa sähkötehotasapainon hallintaan ja maalämpöjärjestelmän sähkön kokonaiskulutus on lähes sama kysyntäjoustop kanssa kuin ilman kysyntäjoustop.

Taulukko 8. Maalämpöjärjestelmän sähkön kulutus ja tehontarve.

	Minimi sisälämpötila käyttöaikoina vuoden aikajakso	Maalämpöjärjestelmän sähkön kulutus	Maalämpöjärjestelmän korkein tehontarve
	°C	MWh / vuosi	kW
Ei joustoa	21,09 (Asunto 5, mh)	17,80	12,26
3h jousto	20,86 (Asunto 5, mh)	17,56	16,20
6h jousto	20,74 (Asunto 5, mh)	17,33	17,76

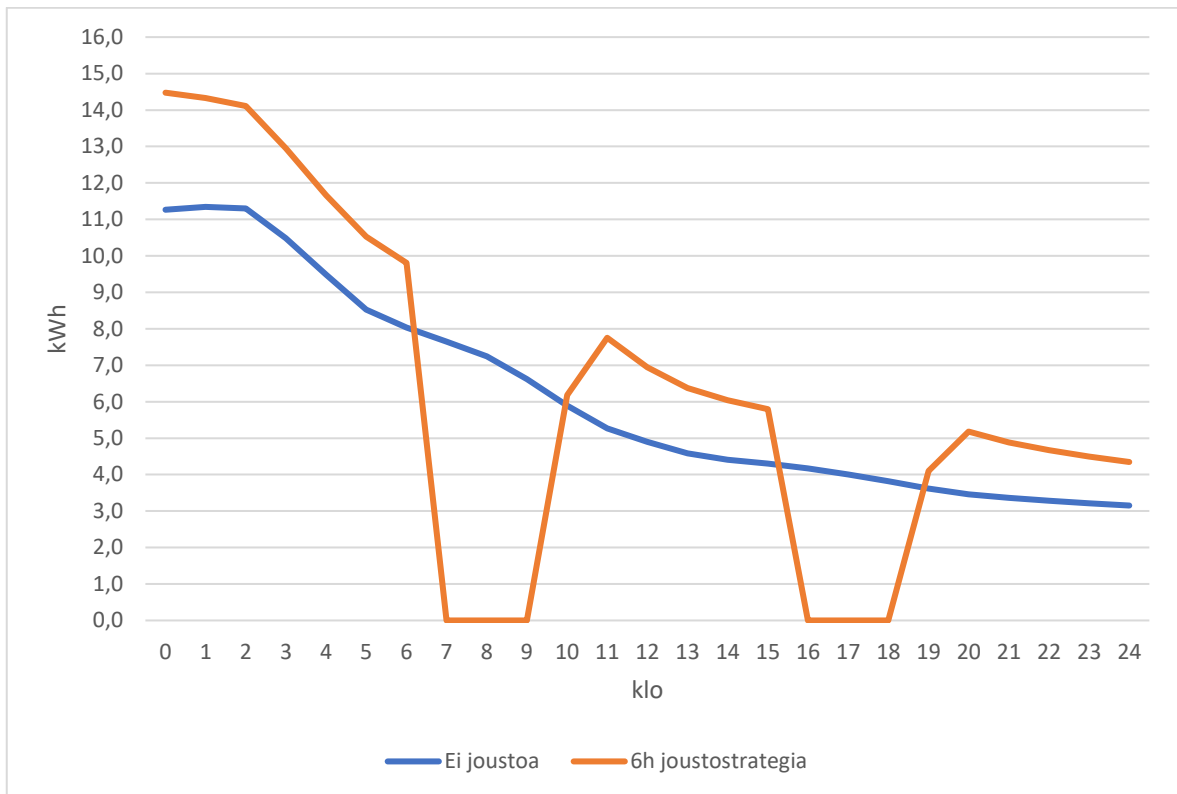
Lämmitysjärjestelmän tarvitsema vuotuinen lämpöenergia putoaa 6 h joustostrategiassa noin 1,1 MWh verrattuna tilanteeseen ilman kysyntäjoustop, mutta vastaavasti ilmanvaihdon vuotuinen lämpöenergia kasvaa noin 0,6 MWh verrattuna tilanteeseen ilman kysyntäjoustop. Rakennuksen ostoenergian määrä vuositasolla kasvaa 6 h joustostrategialla noin 0,2 MWh verrattuna tilanteeseen ilman kysyntäjoustop. Ostoenergia sisältää valaistussähkön, jäähdytyksen, LVI-sähkön, lämpöpumpun sähkön käytön, lämpimän käyttöveden valmistamisen sekä laitesähkön.

Taulukko 9. Lämmitysjärjestelmän lämpöenergia, ilmanvaihdon lämpöenergia sekä ostoenergia.

	Lämmitysjärjestelmän lämpöenergia	Ilmanvaihdon lämpöenergia	Ostoenergia, yhteensä
	MWh / vuosi	MWh / vuosi	MWh / vuosi
Ei joustoa	54,89	63,41	333,02
3h jousto	54,36	63,72	333,17
6h jousto	53,76	63,96	333,23

Tuloksien perusteella kysyntäjoustop toteuttaminen ei vaikuta rakennuksen ostoenergian määrään merkittävästi eli valitut kysyntäjoustopstrategiat ei säästä tai lisää kokonaisenergian käyttöä vaan siirtää ajankohtia, jolloin energiaa käytetään.

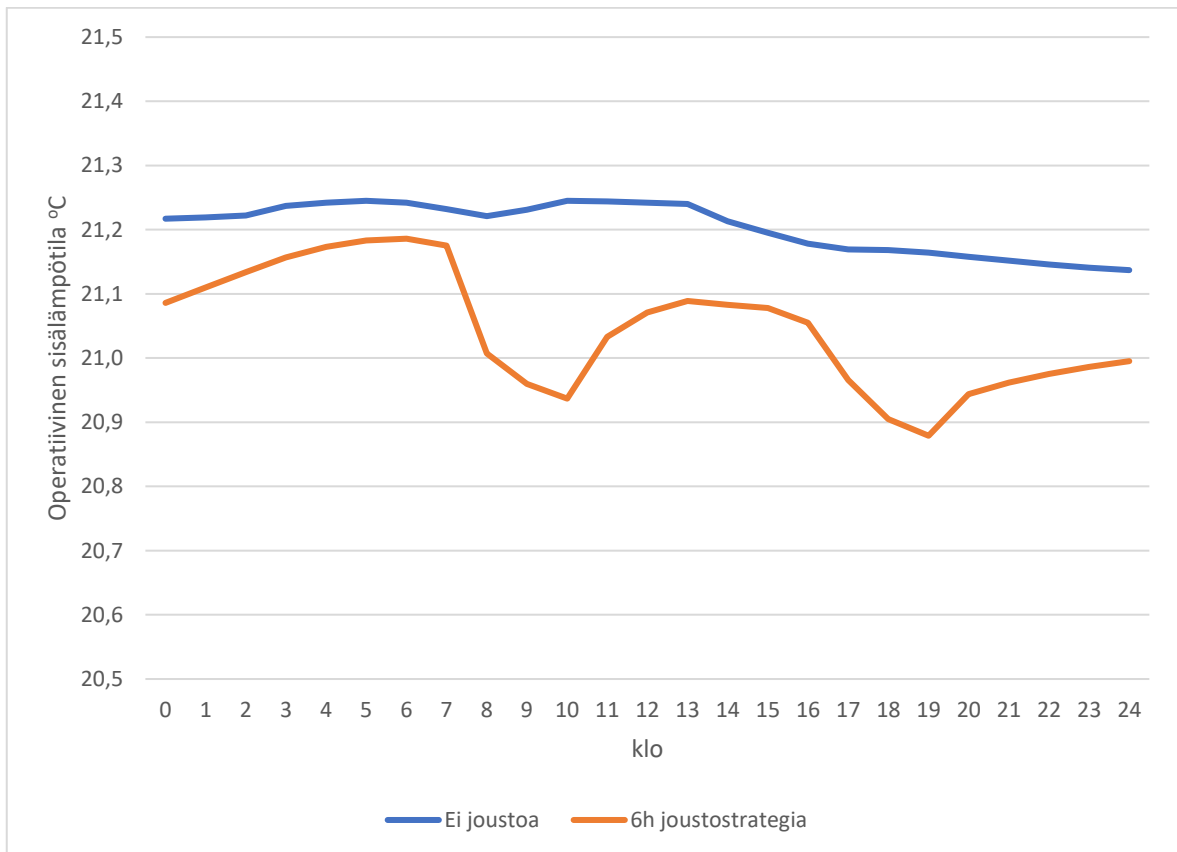
Kuvassa 26 esitetään lämpöpumpun sähköenergian käyttö tuntitasolla 15.1 tilanteessa ilman kysyntäjoustopia sekä 6 h kysyntäjoustopstrategialla. Kysyntäjoustopin aikana sähköenergian tarve on keskimäärin noin 32 % suurempi kuin tilanteessa ilman kysyntäjoustopia, jos lämmityksen pysäytyshetkiä ei oteta huomioon. Kysyntäjoustopin aikana lämmityksen ollessa seis maalämpöjärjestelmän sähkötehon tarve tippuu keskimäärin klo 7-10 joustopin aikana noin 7 kW ja klo 16-19 joustopin aikana noin 4 kW verrattuna tilanteeseen ilman kysyntäjoustopia. Kokonaisenergian kulutus päivän aikana on 6 h joustopstrategialla 0,8 % suurempi kuin tilanteessa ilman kysyntäjoustopia eli energiatase pysyy lähes samana ja kysyntäjoustopilla vaikutetaan sähkötehotasapainon hallintaan kulutuksen siirtyessä eri ajankohtaan, kuten kuva 26 osoittaa.



Kuva 26. Maalämpöjärjestelmän sähköenergian käyttö 15.1. Y-akselilla sähköenergian kulutus kWh ja x-akselilla kellonaika.

Kysyntäjoustopäättyessä ei ole havaittavissa suurta tehopiikkiä, sillä lämpötila pysyy asetusravon sisällä ja lämpöpumpun ei tarvitse käydä täydellä teholla jouston päättyttyä.

Kuvassa 27 esitetään asunnon 5 makuuhuoneen operatiivinen sisälämpötila tilanteessa ilman kysyntäjoustopäättyä sekä 6 h kysyntäjoustopäättyä. Kuvasta nähdään, että lämpötilat eivät poikkea merkittävästi toisistaan tilanteessa ilman kysyntäjoustopäättyä ja 6 h kysyntäjoustopäättyä välillä. Operatiivinen sisälämpötila poikkeaa kysyntäjoustopäättyä aikana korkeimmillaan noin 0,3 °C tilanteesta ilman kysyntäjoustopäättyä noin klo 18 aikaan. Suurimmat erot ovat joustohetkien aikana ja muuten operatiivinen sisälämpötila pysyy noin 0,1 °C sisällä jouston aikana verrattuna tilanteeseen ilman joustoa. Operatiivinen sisälämpötila on jatkuvasti hieman matalampi kysyntäjoustopäättyä tehtäessä eli lämpötila ei ehdi palautua siihen, mitä se olisi ilman kysyntäjoustopäättyä, mutta pysyy kuitenkin koko ajan yli 20 °C:een.



Kuva 27. Asunnon nro 5 makuuhuoneen operatiivinen sisälämpötila 15.1. Y-akselilla operatiivinen sisälämpötila [°C] ja x-akselilla kellonaika.

Sisälämpötilan trendi on hieman laskeva kysyntäjouston aikana, mutta pysyy kuitenkin asetusarvossa 21 °C +/- 1 °C. Sisälämpötilan huojunta kysyntäjouston aikana pysyy 0,3 °C:een sisällä.

#### 6.4.2 Patterilämmitys rakennus

Kysyntäjoustosimuloinnin tulokset on esitetty taulukoissa 10 ja 11. Tuloksia verrataan tilanteeseen ilman kysyntäjoustoa. Alin sisälämpötila jokaisessa tilanteessa käytön aikana esiintyy asunnon 5 makuuhuoneessa. Kysyntäjouston aikainen alin sisälämpötila poikkeaa 6 h joustostrategialla noin 0,9 °C tilanteesta ilman kysyntäjoustoa. Maalämpöjärjestelmän vuotuinen sähkön kulutus laskee 6 h joustostrategialla noin 1,3 MWh eli noin 1300 kWh verrattuna tilanteeseen ilman kysyntäjoustoa. Maalämpöjärjestelmän korkein tehontarve kasvaa 6 h jouston aikana noin 4,1 kW verrattuna tilanteeseen ilman kysyntäjoustoa, mutta kysyntäjouston aikana maalämpöjärjestelmän sähkötehontarve tippuu suurimmillaan noin 9

kW verrattuna tilanteeseen ilman kysyntäjoustoja. Tuloksien perusteella valittu kysyntäjoustostrategia vaikuttaa enemmän sähkötehotasapainon hallintaan ja maalämpöjärjestelmän sähkön kokonaiskulutus on lähes sama kysyntäjouston kanssa kuin ilman kysyntäjoustoja.

Taulukko 10. Maalämpöjärjestelmän sähkön kulutus ja tehontarve.

	Minimi sisälämpötila käyttöaikoina vuoden aikajakso	Maalämpöjärjestelmän sähkön kulutus	Maalämpöjärjestelmän korkein tehontarve
	°C	MWh / vuosi	kW
Ei joustoja	20,50 (Asunto 5, mh)	19,86	10,02
3h jousto	19,87 (Asunto 5, mh)	19,29	12,41
6h jousto	19,66 (Asunto 5, mh)	18,53	14,10

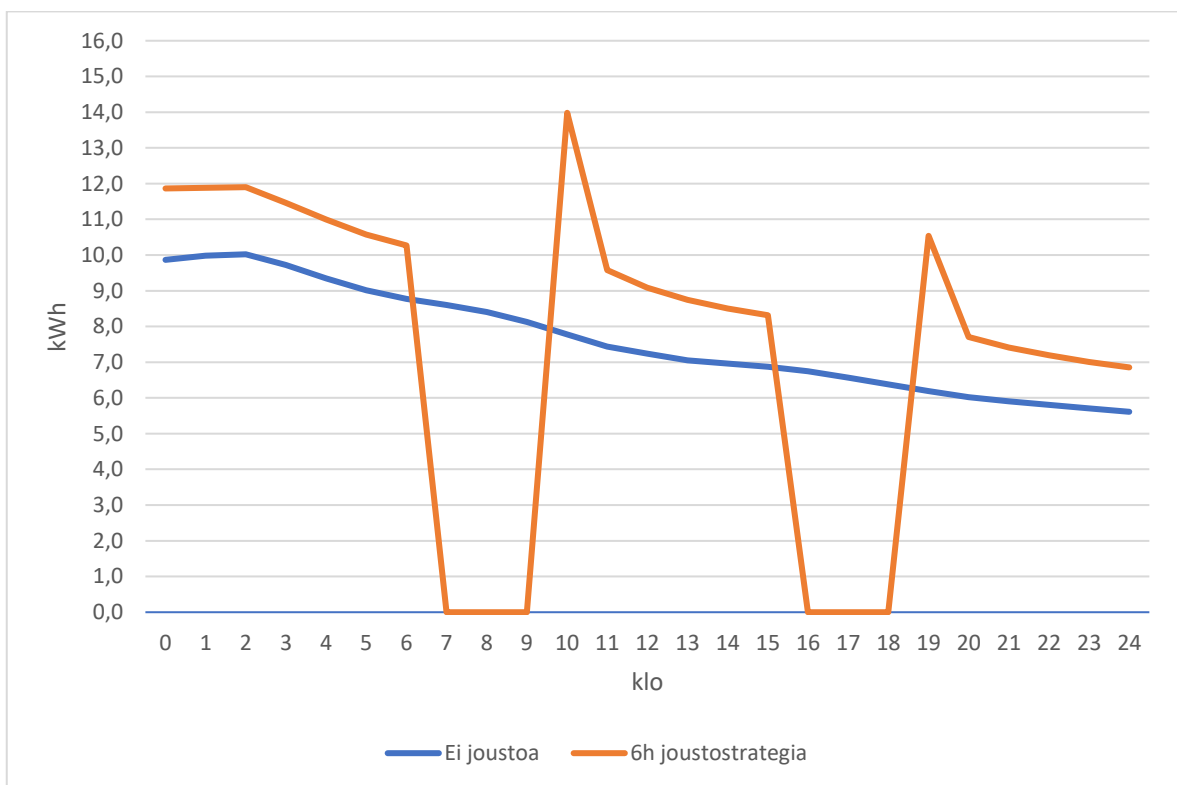
Lämmitysjärjestelmän tarvitsema vuotuinen lämpöenergia putoaa 6 h joustostrategiassa noin 3,3 MWh verrattuna tilanteeseen ilman kysyntäjoustoja, mutta vastaavasti ilmanvaihdon vuotuinen lämpöenergia kasvaa noin 1 MWh verrattuna tilanteeseen ilman kysyntäjoustoja. Rakennuksen ostoenergian määrä vuositasolla kasvaa 6 h joustostrategialla noin 0,1 MWh verrattuna tilanteeseen ilman kysyntäjoustoja. Ostoenergia sisältää valaistussähkön, jäähdytyksen, LVI-sähkön, lämpöpumpun sähkön käytön, lämpimän käyttöveden valmistamisen sekä laitesähkön.

Taulukko 11. Lämmitysjärjestelmän lämpöenergia, ilmanvaihdon lämpöenergia sekä ostoenergia.

	Lämmitysjärjestelmän lämpöenergia	Ilmanvaihdon lämpöenergia	Ostoenergia, yhteensä
	MWh / vuosi	MWh / vuosi	MWh / vuosi
Ei joustoja	49,66	64,92	336,80
3h jousto	48,22	65,45	336,84
6h jousto	46,33	65,97	336,72

Tuloksien perusteella kysyntäjoustop toteuttaminen ei vaikuta rakennuksen ostoenergian määrään merkittävästi eli valittu kysyntäjoustopstrategia ei säästä tai lisää kokonaisenergian käyttöä vaan siirtää ajankohtia, jolloin energiaa käytetään.

Kuvassa 28 esitetään lämpöpumpun sähköenergian käyttö tuntitasolla 15.1 tilanteessa ilman kysyntäjoustopia sekä 6 h joustostrategialla. Kysyntäjoustopin aikana sähköenergian tarve on keskimäärin noin 27 % suurempi kuin tilanteessa ilman kysyntäjoustopia, jos lämmityksen pysäytys hetkiä ei oteta huomioon. Kysyntäjoustopin aikana lämmityksen ollessa seis maalämpöjärjestelmän sähkötehon tarve tippuu keskimäärin klo 7-10 joustoin aikana noin 8,5 kW ja klo 16-19 joustoin aikana noin 6,5 kW verrattuna tilanteeseen ilman kysyntäjoustopia. Kokonaisenergian kulutus päivän aikana on 6 h joustostrategialla 3,3 % pienempi kuin tilanteessa ilman kysyntäjoustopia.

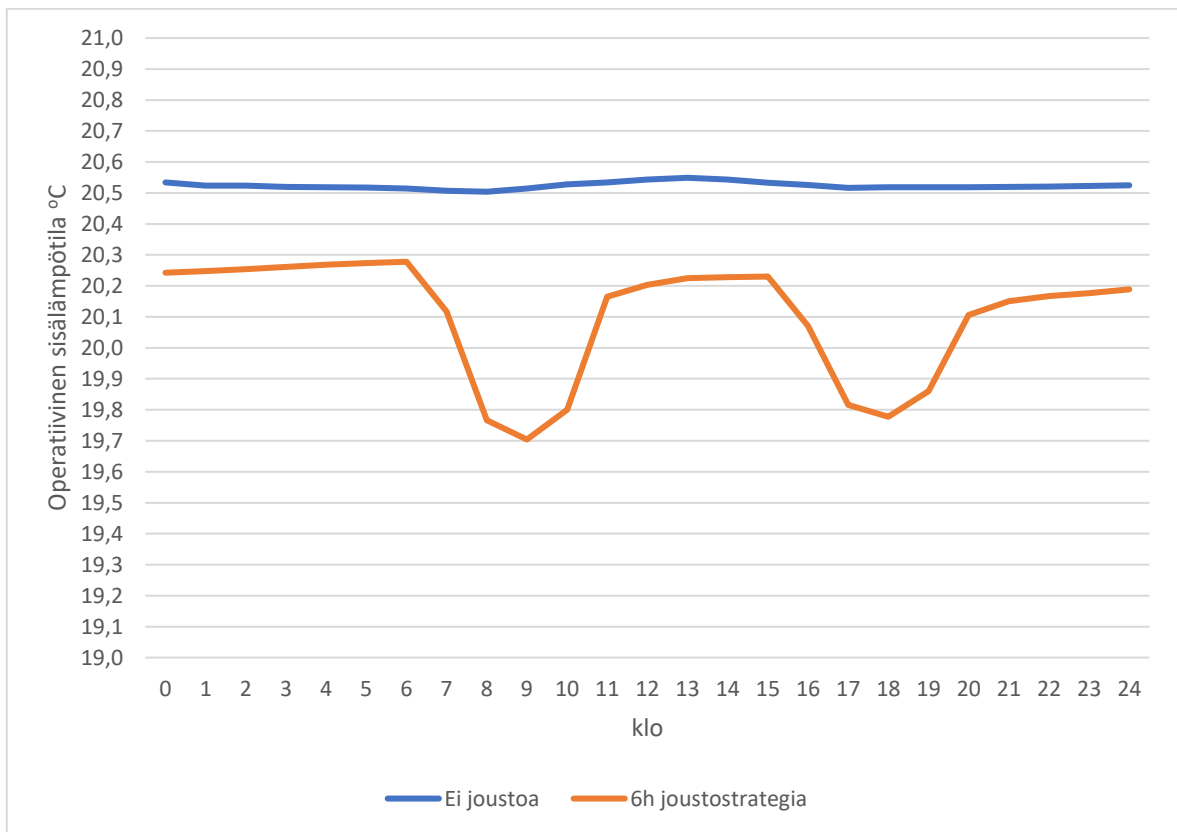


Kuva 28. Maalämpöjärjestelmän sähköenergian käyttö 15.1. Y-akselilla sähköenergian kulutus kWh ja x-akselilla kellonaika.



Kysyntäjoustopäätymisen jälkeen on havaittavissa noin tunnin mittainen ”tehopiikki”, jolloin maalämpöpumppu toimii täydellä teholla pyrkien nostamaan sisälämpötilan asetusarvoonsa.

Kuvassa 29 esitetään asunnon 5 makuuhuoneen operatiivinen sisälämpötila tilanteessa ilman kysyntäjoustopäätymistä sekä 6 h joustostrategialla. Kuvasta nähdään, että lämpötilat eivät poikkea merkittävästi toisistaan tilanteessa ilman kysyntäjoustopäätymistä ja 6 h joustostrategian välillä. Joustopäätymisen aikana operatiivinen lämpötila pysyy 0,5 °C:n vaihteluvälillä sisällä ja lämpötila laskee joustopäätymisen aikana alle 20 °C, mutta pysyy jatkuvasti yli 19,5 °C:n.



Kuva 29. Asunnon nro 5 makuuhuoneen operatiivinen sisälämpötila 15.1. Y-akselilla operatiivinen sisälämpötila [°C] ja x-akselilla kellonaika.

Sisälämpötila palautuminen joustopäätymisen jälkeen kestää noin yhden tunnin ajan, minkä jälkeen lämpötila tasoittuu. Tämä oli havaittavissa myös korkeana lämpöpumpun sähkötehona vastaavana ajankohtana kuvassa 28. Sisälämpötilan huojunta kysyntäjoustopäätymisen aikana pysyy 0,5 °C:een sisällä.

## 7 Johtopäätökset

Maalämpöjärjestelmien kysyntäjousto on Suomessa ainakin toistaiseksi hieman tuntematon aiheena, mutta diplomityötä kirjoittaessa markkinoille on tullut palveluvaihtoehtoja ohjata maalämpöjärjestelmää sähkön SPOT-hinnan perusteella.

Lämpöpumpputyypin valinnalla on merkittävä vaikutus kun suunnitellaan maalämpöjärjestelmän kysyntäjousto. Perinteisissä on/off- tyyppisissä lämpöpumpuissa on omat sisäiset minimikäyntiajat ja minimi pysäytysajat, jotka suojaavat kompressoria ja pidentävät niiden elinkaarta, mutta aiheuttavat rajoituksia kysyntäjouston toteuttamiseen, sillä jousto tehtäessä lämpöpumpun kompressoreita voi ohjata ainoastaan päälle tai pois. Invertteriohjatut kompressorit mahdollistavat paremmin kysyntäjouston toteuttamista, sillä kompressorin tehoa voidaan joko lisätä tai vähentää ilman, että kompressoria tarvitsee kokonaan sammuttaa tai käynnistää täydelle teholle. Jatkotutkimusaiheena invertteriohjattujen kompressorien hyötysuhteita tulisi tarkastella tarkemmin eri tehonsäädöillä, jotta kysyntäjouston seurauksena lämpöpumppua ei ajeta huonolla hyötysuhteella vaan pysytään hyvissä COP-arvoissa.

Maalämpöpumppujen ohjaustavan muuttaminen on oleellista kysyntäjouston toteuttamisen kannalta. Ohjaustapaa muuttamalla on mahdollista toteuttaa erilaisia kysyntäjoustostrategioita. Lämmöntuotantoa ohjataan perinteisesti koko rakennuksen lämmöntarpeen mukaan eli lähtevän menoveden asetusarvoa muuttamalla, mutta automaation avulla ohjausta pystytään toteuttamaan esimerkiksi sähkön hinnan tai sähkömarkkinoiden tarpeiden mukaan huomioimalla huonelämpötilat. Ohjaustavan muuttaminen kysyntäjouston mukaan vaatii kuitenkin huonekohtaisen lämpötilamittauksen, jotta kysyntäjouston vaikutuksista sisäolosuhteisiin pystytään varmistumaan ja tarvittaessa pysäyttämään jousto tai muuttamaan kysyntäjoustostrategiaa, sillä huoneiden tehontarpeiden välillä on eroja. Fingridin reservimarkkinoilla lämpöpumppua ohjaa sähkön kantaverkon taajuus, mutta esimerkiksi leikkaamalla maalämpöjärjestelmän huipputehoja tai siirtämällä kulutusta tulee lähtökohtaisesti ohjata huoneolosuhteiden mukaan eli poikkeuttaa huoneiden lämpötilan asetusarvoja, jolloin myös maalämpöjärjestelmä seuraa ohjausta tehoa pudottamalla tai sammuttalla kompressorin.

Lämmitystilanteessa asuinrakennuksien eri huoneiden välillä on eroa lämpötiloissa sekä lämmitystarpeissa. Tähän vaikuttaa mm. se, sijaitseeko huone rakennuksen ulkoseinää vasten tai onko huoneen seinien ilmansuunnat pohjoiseen tai mikä on huoneen käyttöaste (sisäiset kuormat). Tällöin ulkoiset lämpökuormat vaihtelevat tilojen välillä ja kysyntäjoustotilanteessa huoneolosuhteiden erot voivat korostua, jos niitä ei oteta huomioon suunnittelussa. Sisäolosuhteiden näkökulmasta kysyntäjoustoa tulisi ohjata huonekohtaisesti esimerkiksi huoneen lämpötilamittauksen avulla, jotta erot eri huoneiden välillä eivät kasva kysyntäjoustopäivien aikana. Huoneohjausta toteutetaan esimerkiksi ohjaamalla huoneen lattialämmitysventtiiliä huonelämpötilamittauksen mukaan kiinni tai auki. Huoneita ohjaamalla saadaan lämmitysjärjestelmä joustamaan, mutta hitaammin kuin suoraan lämpöpumppua ohjaamalla, jolloin jousto ei sovellu reservimarkkinoiden aikavaatimuksiin.

Rakennuksen lämpöinertian määrä vaikuttaa siihen kuinka pitkään kysyntäjoustoa voidaan maksimissaan tehdä. Simulointien tuloksien perusteella lattialämmitteisessä rakennuksessa operatiivinen huonelämpötila laskee loivemmin kuin patterilämmitteisessä rakennuksessa kysyntäjoustopäivien aikana. Kummassakaan lämmönjakelumuodossa lämpötila ei kuitenkaan laske merkittävästi ja huoneet pysyvät lämpiminä rakenteisiin varautuneen lämmön vapautuessa. Kysyntäjoustoa voidaan tuloksien perusteella toteuttaa esimerkiksi niin, että sähkön hinnan ollessa korkealla sallitaan sisälämpötilan laskea normaalia alemmaksi ja hyödynnetään rakenteisiin varautunut lämpö. Tämän tutkimuksen tuloksia ei voi soveltaa kuitenkaan esimerkiksi puukerrostaloihin, sillä betonikerrostaloissa on enemmän varaavaa massaa kuin puukerrostaloissa, jolloin muutokset huoneolosuhteissa ovat hitaammat johtuen siitä, että betonilla on korkeampi lämpöinertia eli betoni varaa enemmän lämpöä rakenteisiin kuin puukerrostalo.

Asuinrakennusten lämpimän käyttöveden valmistaminen aiheuttaa rajoitteita kysyntäjoustopäivien toteutukseen. Tässä tutkimuksessa keskityttiin toteuttamaan kysyntäjoustoa rakennuksen lämmitysjärjestelmän avulla ja vaikutuksia käyttöveden lämpötiloihin ei tutkittu. Käyttöveden lämpötilan tulee olla vesilaitteistoissa ennen vuotta 2007 valmistuneissa rakennuksissa 50 °C ja sen jälkeen valmistuneissa rakennuksissa vähintään 55 °C legionellabakteerin vuoksi. Jos asuinrakennuksessa on yksi maalämpöpumppu, millä tehdään sekä lämmitysvesi että lämminkäyttövesi, on kysyntäjoustopäivien toteutuksessa otettava huomioon käyttöveden valmistaminen ja vesilaitteiston minimilämpötila vaatimukset.

Fingridin ylläpitämät reservimarkinat ovat potentiaalinen markkinapaikka asuinkerrostalon maalämpöjärjestelmän kysyntäjoukosta. Yksittäisen asuinkerrostalon lämpöpumpun sähköteho on harvoin niin iso, että se täyttää Fingridin reservien minimi tehovaatimukset, mutta yhdistämällä aggregaattorin avulla useampi asuinkerrostalo yhdeksi virtuaalivoimalaitokseksi, saavutetaan markkinoiden minimi tehovaatimukset. On/off tyyppiset kompressorit eivät ainakaan yksittäisinä ohjauspisteinä sovellu nopeaan reserviin niiden minimikäynti- ja pysähdysaikojen vuoksi, mutta voisivat sopia esimerkiksi aFFR-markkinan ylösjouktoon eli kun kantaverkossa tarvitaan tehonvähennystä, ohjataan lämmitystä tekeviä lämpöpumppuja kiinni. Jatkotutkimusaiheena tulisi selvittää kuinka kauan kyseisen reservin jouktohetket tyypillisesti kestävät ja mitkä ovat markkinaan liitettävien lämpöpumppujen sisäiset käyntiaikaehdot. Invertteriohjatut kompressorit sopivat paremmin nopeampiin reserveihin, sillä lämpöpumppujen tehoa voidaan säätää portaattomasti kantaverkon taajuuden mukaan asettamalla tehonsäätöalueet invertterikompressoreille sopiviksi. Tällöin tulee varmistua vaikutuksista invertteriohjatun kompressorin hyötysuhteeseen, ettei lämpöpumppua ajeta joukton vuoksi tarpeettoman huonolla hyötysuhteella. Keväällä 2023 käyttöön tuleva varttitase reservimarkkinoilla helpottaa asuinkerrostalojen maalämpöjärjestelmien liittämistä reservimarkkinoille. Lyhyemmät, 15 minuutin pituiset reserviajat, aiheuttavat vähemmän häiriöitä olosuhteissa ja esimerkiksi lämpimän käyttöveden tarve aiheuttaa vähemmän haasteita kysyntäjoukoston toteuttamiselle, kun reserviajat lyhenevät 15 minuuttiin.

Case-asuinkerrostalon simulointien avulla selvitettiin, että yksittäisen keskikokoisen asuinkerrostalon maalämpöjärjestelmän kysyntäjoukoston tehopotentiaali on keskimäärin noin 3-4 kW kun ulkolämpötila on alle 0 °C:een ja tilalämmitysjärjestelmä pysäytetään kokonaan. Tehopotentiaali on laskettu lämmitysjärjestelmän joukton avulla, eikä maalämpöpumpun tehoa määritelty etukäteen. Todelliseen joukstopotentiaaliin vaikuttaa lisäksi se, että maalämpöjärjestelmällä tuotetaan yleensä myös lämmin käyttövesi ja joissain tapauksissa myös ilmanvaihdon tarvitsema lämmitysenergia, mikä nostaa potentiaalia. Lisäksi työssä ei mitoitettu maalämpöpumppua vaan maalämpöpumppu sai niin paljon tehoa kuin tilalämmitys vaati. Todellisuudessa maalämpöpumppu mitoitetaan tietyn tehon mukaiseksi, mikä rajoittaa ja laskee joukstopotentiaalin korkeimpia tuloksia, sillä maalämpöpumppua ei yleensä mitoiteta täydelle teholle. Joukstopotentiaali painottuu lämmityskauden kuukausille ja potentiaalia on käytössä noin puolet vuoden tunneista. Lämmityskauden ulkopuolella lämpöpumppuilla ei ole potentiaalia kysyntäjoukoston tai osallistua reservimarkkinoille

muuten kuin lisäämällä tehoa, mutta se lisääsi asuinrakennuksen jäähdytystarvetta, jos tilalämmitystä hyödynnetään kysyntäjoustossa. Maalämpöjärjestelmällä pystytään tuottamaan rakennuksen tarvitsema jäähdytys, joten periaatteessa jäähdytystä hyödyntämällä maalämpöjärjestelmää voisi hyödyntää vastaavalla tavalla kysyntäjoustossa, mutta asian tutkiminen ei kuulunut työn tavoitteisiin. Tuloksien luotettavuuteen vaikuttaa käytetty säädädata eli Helsingin testivuosi TRY 2012 säädädata. Sää vaihtelee vuosittain ja paikkakunnittain, joten erilaisella säädätällä potentiaali voi olla huomattavasti erilainen. Tuloksia ei myöskään tule hyödyntää muun paikkakunnan asuinrakennuksissa, jotka sijaitsevat eri säävyöhykkeellä. Todelliseen potentiaaliin vaikuttaa lisäksi se, käytetäänkö on/off kompressoria vai invertteriohjattua kompressoria. Lämpötilan pysyvyyskäyrä kuvaa lämpöpumpun sähköenergian tarvetta tunnin keskiarvona, mutta todellisuudessa lämpöpumppu ei todennäköisesti käy samalla teholla koko tunnin ajan ja siihen vaikuttaa myös kompressorien tyypit ja ohjaustavat. On/off lämpöpumppu pysähtyy, kun termostaatin asetusarvo ja hystereesi saavutetaan eli todellisessa tilanteessa lämpöpumppu voi olla hetkittäin tunnin aikana pysähdyksissä silloin, kun lämmitystehontarve on vähäistä. Invertteriohjattu kompressori taas käy lähtökohtaisesti jatkuvasti pitäen menoveden asetusarvossaan tehoa säätämällä, mikä on otettava huomioon tehonvaihteluna tunnin aikajaksolla. Tuloksien luotettavuuteen vaikuttaa myös simuloinneissa vakiona käytetty COP-arvo, mikä vaihtelee todellisuudessa lämmitysverkostojen lämpötilojen mukaan. Simuloitu potentiaali kuvaa tilalämmitysjärjestelmän tarvitsemaa sähköenergiaa ja todellisuudessa maalämpöjärjestelmällä tuotetaan tilalämmityksen lisäksi lämmin käyttövesi ja joissain rakennuksissa myös keskitetyn ilmanvaihtokoneen lämmitysenergia, jolloin potentiaali on sähköenergian puolesta suurempi, mutta jouston toteuttaminen on rajoitetumpaa mm. lämpimän käyttöveden minimilämpötila-asetuksen vuoksi sekä ilmanvaihtokoneiden lämmityspattereiden jäätymisriskien vuoksi.

Patterilämmitteisen asuinkerrostalon maalämpöjärjestelmän sähkön huipputehon tarve pitäisi teorian mukaan olla lähtökohtaisesti suurempi kuin lattialämmitteisen asuinkerrostalon, sillä patteriverkostossa on korkeampi lämpötila kuin lattialämmitysverkostossa, mikä vaikuttaa heikentäväsi lämpöpumpun COP-arvoon ja korkeampi verkostolämpötila lisää lämpöhäviöiden määrää. Simulointien tulokset ovat kuitenkin päinvastaiset, mikä voi johtua työn tekijän IDA ICE- simulointiohjelman käytön heikosta osaamisesta aiheuttaen siten virheitä tuloksiin. Tuloksien perusteella lattialämmitteinen asuinkerrostalo myös kuluttaa enemmän tilalämmitysenergiaa kuin

patterilämmitteinen asuinkerrostalo, mutta paremman lämpöpumpun COP-arvon vuoksi lattialämmitysjärjestelmä käyttää vähemmän primäärienergiaa. Jatkotutkimusaiheena tulisi vertailla tarkemmin patterilämmitteisen ja lattialämmitteisen asuinkerrostalon maalämpöjärjestelmän sähkön huipputehontarvetta ja tilalämmityksen energiankulutusta, jotta tämän tutkimuksen tuloksiin saadaan lisää luotettavuutta.

Case-asuinkerrostalon simulointien perusteella todettiin, että lämmityksen pysäyttäminen 12 tunnin ajaksi huipputehoajankohtana ei aiheuta operatiiviseen sisälämpötilaan enempää kuin 1 °C muutoksen. Sisälämpötila pysyy jatkuvasti yli 18 °C, mikä on Sosiaali- ja terveystieteiden ministeriön määrittelemä lämpötilan alatoimenpideraja huonelämpötilalle. Tuloksista todettiin, että lattialämmitysrakennuksessa operatiivisen lämpötilan laskeminen on hitaampaa ja tasaisempaa, kuin patterilämmitysrakennuksessa. Operatiivisen lämpötilan muutoksien erot johtuvat siitä, että lattialämmitysrakennus varaa lämpöä enemmän rakenteisiin kuin patterilämmitysrakennus. Simulointitulosten perusteella voidaan todeta, että asuinkerrostalon maalämpöjärjestelmä pystytään pysäyttämään 12 tunnin ajaksi ilman, että sisäolosuhteisiin aiheutuu merkittävää haittaa. Tästä saadaan aikaraami sille, kuinka pitkään kysyntäjoustoa voidaan tehdä heikentämättä sisäolosuhteita. Sopeutumalla hetkittäisiin ja suhteellisen pieniin lämpötilamuutoksiin ja hyväksymällä hetkittäin alhaisemmat lämpötilat, pystytään asuinrakennuksen maalämpöjärjestelmällä osallistumaan kysyntäjouksoon. Sallimalla vielä suuremmat sisälämpötilan heilahtelut kysyntäjouksoon aikaan saadaan huomattavasti lisää potentiaalia kysyntäjouksoon.

Simulointiin valituilla 3 h sekä 6 h kysyntäjoukostostrategioilla ei tulosten perusteella ole merkittävää vaikutusta case-asuinrakennuksen maalämpöjärjestelmän vuotuisen sähkönkulutukseen, eikä myöskään vuotuisen kokonaisenergian kulutukseen verrattuna tilanteeseen ilman kysyntäjouktoa. Valituilla kysyntäjoukostostrategioilla ei myöskään heikennetä huoneiden sisäolosuhteita merkittävästi, sillä muutokset operatiivisessa huonelämpötilassa pysyvät korkeintaan 1 °C:een sisällä. Ilmanvaihdon tarvitsema lämmitysenergia ei myöskään kasva merkittävästi vaikka tilalämmitysjärjestelmä on kysyntäjoukostostrategian mukaisesti ajoittain kiinni. Sen sijaan kysyntäjoukostostrategioiden aikana maalämpöjärjestelmä käy korkeammalla teholla ja kuluttaa keskimäärin noin 32 % enemmän sähköä baseline- tilanteeseen verrattuna, mutta kokonaisenergian kulutus pysyy kuitenkin samana ja joukoston aikana maalämpöjärjestelmän tehontarve on 0 kW. Tulosten perusteella voidaan todeta, että kysyntäjoukoston toteuttaminen valituilla strategioilla ei lisää

maalämpöjärjestelmän kokonaisenergiakulutusta ja kasvata siten energiakustannuksia vaan energiatase pysyy muuttumattomana. Jos ko. kysyntäjoustostrategiaa sovelletaan useammassa asuinrakennuksessa yhtä aikaa, tulisi jatkotutkimusaiheena selvittää, aiheuttaako yhtäaikainen kysyntäjoustopäätyminen suurta kuormitusta sähköverkon suuntaan. Tämän työn simulaatioissa lämmitys palautettiin täydelle teholle välittömästi kysyntäjoustopäätyttyä, jotta tuloksista nähdään tehopiikkien vaikutus energiankulutukseen. Lämmitys on mahdollista palauttaa takaisin käyttöön portaittain, mutta tällöin lämpötilan palautumista tulee tutkia tarkemmin. Maalämpöpumpulle ei myöskään asetettu maksimitehoa simuloinneissa, joten todellisessa tilanteessa lämpöpumpun maksimiteho ei välttämättä ole niin suuri kuin simuloinneissa, eikä lämpöpumppu välttämättä käy niin paljon suuremmalla teholla verrattuna baseline-tilanteeseen. Tässä tutkimuksessa maalämpöpumpun tehopeitto oli 100 %, kun se todellisuudessa on noin 60-80%. Todellisessa tilanteessa kysyntäjoustoä suoritettaessa tulee sen vuoksi varmistaa erikseen, ettei tarvittavaa lisätehoa- tai energiaa tuoteta sähkövastuksilla tai sähkökattilalla ja onko kysyntäjoustopäätyttyä keskimääräisesti suuremmalla tehontarpeella vaikutusta lämpöpumpun mitoitus-tehoon.

Lämmitystä voidaan siirtää esimerkiksi sähkön SPOT-hinnan mukaan edullisimmille tunneille ja simulointituloksien perusteella tällä ei ole sisäolosuhteita merkittävästi heikentävää vaikutusta, jos lämmityksen siirtäminen kestää enintään 12 tuntia kerrallaan. Maalämpöjärjestelmä ei tämän tutkimuksen mukaan kuluta kysyntäjoustopäätyttyä enemmän energiaa kuin ilman kysyntäjoustopäätyttyä, mutta lämpöpumput tekevät lämpöenergiaa suuremmalla keskimääräisellä teholla joustojaksojen välissä. Kysyntäjoustopäätyttyä toteuttaminen on siis tehotasapainon hallintaa, sillä kysyntäjoustopäätyttyä aikainen sähkötehon tarve on 0 kW kun taas joustojaksojen välissä tehontarve on hieman korkeampi kuin mitä se on ilman kysyntäjoustopäätyttyä. Kuluvana talvena maaliskuun 6. päivä sähkön SPOT-hinta oli 21,7 senttiä/kWh klo 8-9 välisenä aikana ja halvimmillaan sähkön SPOT-hinta oli ko. ajankohtana 11,1 senttiä/kWh klo 23-00 välisenä aikana. Säästöjen tarkempi laskenta ei kuulu tämän työn tavoitteisiin, mutta jos oletetaan, että maalämpöpumppu käy ilman kysyntäjoustopäätyttyä 7 kW teholla, kuten kuvassa 26, ja sähköenergian hintaero halvimman ja kalliimman SPOT-hinnan välillä on 10 senttiä/kWh, niin 6h kysyntäjoustopäätyttyä strategian avulla sähköenergiatase säästöpotentiaali talven aikana on karkeasti arvioituna  $7 \text{ kW} * 6 \text{ h/pv} * 30 \text{ pv/kk} * 4 \text{ kk} * 0,10 \text{ €/kWh} = 504 \text{ €}$ . Säästöpotentiaalın karkea arvio ei huomio joustojaksojen jälkeisen korkeamman tehontarpeen vaikutusta kustannuksiin, mikä pitää ottaa huomioon,

jos arvioidaan todellisia säästöjä energialaskussa. Jatkotutkimuksena tulisi selvittää tällaisen ohjauksen kokonaistaloudellisia vaikutuksia, jos lämmitetään isommalla teholla, mutta kuitenkin edullisimmilla sähkön hinnoilla.

Tämän työn tutkimuksissa ei tarkasteltu lämmön varastointia esilämmittämällä rakennusta ennen kysyntäjouaston aloitusta tai lämpöenergian varaamista varaajiin ennen kysyntäjouaston aloitusta. Jatkotutkimusaiheena tulisi selvittää, saadaanko esilämmityksellä varattua lämpöä rakenteisiin tai varaajiin ja sen avulla pienentämään tarvittavaa lämmitystehoa jouaston päätyttyä tai pidentämään maksimijoustoaikaa.

Tämän työn tekijän IDA ICE -simulointiohjelmiston taidot ovat välttävät, joten se aiheuttaa simulointien tuloksiin ja luotettavuuteen epävarmuutta. Pienetkin virheet simulointiohjelman asetuksissa ja säädöissä tai virheelliset lähtöarvot vaikuttavat simulointien tuloksiin merkittävästi. Tämän lisäksi simuloinnissa käytetty säädädata kertoo tulokset vain Helsingin testivuosi TRY 2012 säädädata mukaan. Myös vyöhykekohtaiset virheet voivat kasvaa suuriksi, sillä simuloinneissa ei mallinnettu jokaista tilaa erikseen vaan tuloksia monistettiin, jolloin yksittäiset virheet kertautuvat.



## 8 Yhteenveto

Ausinkerrostalojen maalämpöjärjestelmät soveltuvat kysyntäjoukseen, mutta kysyntäjoukon toteuttaminen vaatii uudenlaista ajattelutapaa maalämpöjärjestelmän ohjaukseen ja sisäolosuhteiden hetkittäiseen vaihteluun. Keskikokoisen ausinkerrostalon maalämpöjärjestelmän potentiaali kysyntäjoukseen tilalämmitystä joustamalla on keskimäärin noin 3-4 kW, kun ulkolämpötila on alle 0 °C.

Kysyntäjoukolla ei ole merkittävää vaikutusta sisäolosuhteisiin, jos kysyntäjoukko ei kestä pidempään kuin 12 tuntia. Patterilämmitteisessä rakennuksessa asuinhuoneiden operatiivinen lämpötila laskee nopeammin kuin lattialämmitteisessä rakennuksessa, mikä selittyy sillä, että patterilämmitys lämmittää suoraan sisäilmaa. Lattialämmitys varaa lämpöä lattiarakenteisiin ja lämmityksen pysäyttämisen jälkeen lattiarakenteisiin varautunut lämpö purkautuu tasaisesti ja pitää sisälämpötilan laskun loivana.

Patterilämmitteisessä rakennuksessa kysyntäjoukon jälkeinen tehon tarve on suurempi kuin lattialämmitteisessä rakennuksessa, kuten teoriaosuudessa selvitettiin, sillä lattialämmitys varaa lämpöä rakenteisiin ja lämpötilan vaihtelu on hitaampaa verrattuna patterilämmitteiseen rakennukseen. Toisaalta tuloksien perusteella lattialämmitteisessä rakennuksessa maalämpöjärjestelmän huipputeho on korkeampi kuin patterilämmitteisessä rakennuksessa, mille ei löytynyt selitystä.

Kumpikaan lämmönjakelutapa ei lisännyt rakennuksen kokonaisenergiankulutusta, kun joukkoa tehtiin vain tehoa vähentämällä. Teoriaosuudessa läpikäydyissä tutkimuksissa joissain tapauksissa kokonaisenergiankulutus nousi, mutta ko. tutkimuksissa tehtiin kysyntäjoukkoa myös niin, että lämmitystehoa lisättiin ennen tehon leikkausta.

Tutkimuksen tuloksien perusteella patterilämmitteinen rakennus kuluttaa enemmän sähköenergiaa tilalämmitykseen, koska patteriverkostossa on korkeampi lämpötila kuin lattialämmitysverkostossa, mikä heikentää lämpöpumpun COP-arvoa. Lattialämmitteinen rakennus kulutti tuloksien mukaan enemmän tilalämmitysenergiaa vuodessa, vaikka teorian mukaan lämpöhäviöiden pitäisi olla suuremmat patterilämmityksessä, missä käytetään korkeampaa lämpötilaa.

Työssä ei tutkittu lämmitystehon lisäystä ja lämmityksen varaamista rakenteisiin. Teorian perusteella lämpöhäviöitä syntyy enemmän, jos nostetaan lämpötasoja, joten sen vuoksi lämmitystehoa lisäämällä ei pidä nostaa lämpötasoja vaan ajoittaa tehon nostaminen alkamaan riittävän ajoissa. Jatkotutkimusaiheena tulisi selvittää tehon lisäyksen vaikutuksia kokonaisenergian kulutukseen, sillä teoriaosuudessa läpikäytyjen kysyntäjoustopotkimuksien tuloksissa oli ristiriitaa, sillä toisessa tutkimuksessa kokonaisenergian kulutus laski kysyntäjoustopotkimuksesta ja toisessa tutkimuksessa kokonaisenergian kulutus kasvoi kysyntäjoustopotkimuksesta.

Työn tavoitteena oli selvittää asuinkerrostalojen maalämpöjärjestelmien soveltuvuutta kysyntäjoustopotkimukseen, kysyntäjoustopotkimuksen potentiaalia, vaikutuksia sisäilmasto-olosuhteisiin sekä vaikuttaako kysyntäjoustopotkimus rakennuksen energian kulutukseen. Maalämpöpumppujen kompressorityyppi ja ohjaustapa vaikuttaa siihen, miten hyvin maalämpöpumppu soveltuu kysyntäjoustopotkimuksen toteuttamiseen. Huonelämpötilojen mittaaminen on tärkeää kysyntäjoustopotkimusta tehtäessä, sillä lämpötilaerot ja lämmitystehotarpeet vaihtelevat asuinhuoneittain. Työn tulokset osoittavat sen, asuinrakennuksien maalämpöjärjestelmien sähkötehon joustopotentiaali sähköverkon suuntaan on keskimäärin noin 3-4 kW ulkolämpötilan ollessa alle 0 °C:een. Kysyntäjoustopotkimus ei heikennä merkittävästi huoneiden sisäolosuhteita, kun kysyntäjoustopotkimusta ei tehdä pidempään kuin 12 tuntia kerralla. Kysyntäjoustopotkimuksen toteuttaminen kuormaa leikkaamalla ja siirtämällä ei vaikuta asuinrakennuksen kokonaisenergian kulutukseen, mutta työssä ei selvitetty vaikuttaako tehon hetkittäinen lisäys osana kysyntäjoustopotkimusta rakennuksen kokonaisenergian kulutukseen. Tehoa leikkaamalla ja siirtämällä kysyntäjoustopotkimus vaikuttaa maalämpöjärjestelmän sähkötehotasapainon hallintaan ja kulutuksen ajankohtaan. Yhdistämällä useampi asuinkerrostalon maalämpöjärjestelmä yhdeksi virtuaalivoimalaitokseksi saadaan sähkömarkkinoiden suuntaan huomattavaa joustopotentiaalia.

## Lähteet

Airaksinen, M. Vuolle, M. 2013. Heating energy and peak-power demand in a standard and low energy building. *Energies*, Vol 6:1. S.235-250.

Alihommadisagvand, B. Jokisalo, J. Siren, K. 2017. Comparison of four rule-based demand response control algorithms in an electrically and heat pump-heated residential building. *Applied Energy*, 2018. Vol 209. S.167-179. ISSN 0306-2619.

Ali, M. Alihommadisagvand, B. Jokisalo, J. Kilpeläinen, S. Siren, K. 2016. Cost-optimal thermal energy storage system for a residential building with heat pump heating and demand response control. *Applied Energy*, 2016. Vol 174. S.275-287. ISSN 0306-2619

Bertsch, V. Frey, U. Sperber, E. 2020. Reduced-order models for assessing demand response with heat pumps – Insights from the German energy system. *Energy and Buildings*. Vol 223. S110-144. ISSN 0378-7788.

Bruninx, K. Delarue, E. D’haeseleer, W. Helsen, L. Patteeuw, D. Protopapadaki, C. Reynders, G. Saelens, S. 2015. CO<sub>2</sub>-abatement cost of residential heat pumps with active demand response: demand- and supply-side effects. *Applied Energy*, 2015. Vol 156. S.490-501. ISSN 0306-2619.

Chartered Institution of Building Services Engineers. 2013. Ground source heat pumps. [E-Kirja]. [Viitattu 30.9.2022]. Saatavilla: [https://app-knovel-com.ezproxy.cc.lut.fi/kn/resources/kpGSHPCIBE/toc?issue\\_id=kpGSHPCIBE](https://app-knovel-com.ezproxy.cc.lut.fi/kn/resources/kpGSHPCIBE/toc?issue_id=kpGSHPCIBE)

Chiasson, A. 2016. Geothermal heat pump and heat engine systems: Theory and practice. [E-kirja]. [Viitattu 25.09.2022]. Saatavilla: <https://r2.vlereader.com/Reader?ean=9781118961971#>

Eurooppa Neuvosto. Euroopan unionin neuvosto. EU:n vihreän siirtymän suunnitelma. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 14.10.2022]. Saatavissa: <https://www.consilium.europa.eu/fi/policies/green-deal/fit-for-55-the-eu-plan-for-a-green-transition/>

Euroopan parlamentti, 2023. Rakennusten energiatehokkuus: EU-parlamentti hyväksyi kantansa. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 19.04.2023]. Saatavissa: <https://www.europarl.europa.eu/news/fi/press-room/20230310IPR77228/rakennusten-energiatehokkuus-eu-parlamentti-hyvaksyi-kantansa>

Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2010/31/EU (32010L0031); EUVL N:o L 153, 18.6.2010

Energiateollisuus, 2022. Sähköä kannattaa käyttää joustavasti. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 16.10.2022]. Saatavissa: <https://energia.fi/energiasta/energiamarkkinat/sahkomarkkinat/kulutusjousto>

Energiavirasto, 2022. Sähkön vähittäismarkkinat. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 16.10.2022]. Saatavissa: <https://energiavirasto.fi/sahkomarkkinat>

Equa. 2023a. IDA Indoor Climate and Energy. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 17.03.2023]. Saatavissa: <https://www.equa.se/fi/ida-ice>

Equa. 2023b. Validation reports. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 20.04.2023]. Saatavissa: [https://www.equaonline.com/iceuser/new\\_validationreports.html](https://www.equaonline.com/iceuser/new_validationreports.html)

Fichtner, W. Dengiz, T. Jochem, P.. 2019. Demand response with heuristic control strategies for modulating heat pumps. Applied Energy, 2019. Vol 238. S.1346-1360. ISSN 0306-2619.

Fingrid, 2022a. Kantaverkon kehittämissuunnitelma 2022-2031. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 22.10.2022]. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/kantaverkko/kantaverkon-kehittaminen/kantaverkon-kehittamissuunnitelma-2022-2031.pdf>

Fingrid, 2022b. Suomen sähköjärjestelmä. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 14.10.2022]. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/kantaverkko/sahkonsiirto/suomen-sahkojarjestelma/>

Fingrid, 2022c. Reservimarkkinat. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 18.10.2022]. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/#reservilajit>

Fingrid, 2022d. Varttitase eli 15 minuutin taseselvitysjakso. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 16.10.2022]. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/markkinoiden-yhtenaisyyss/pohjoismainen-tasehallinta/varttitase/>

Fingrid Oyj. Energiateollisuus ry, 2010. Hyvä tietää sähkömarkkinoista. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 16.10.2022]. ISBN 978-952-5615-30-2. Saatavissa: [https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/julkaisut/uusi\\_versio\\_sahkomarkk.pdf](https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/julkaisut/uusi_versio_sahkomarkk.pdf)

Finlex. Sähkömarkkinalaki 9.8.2013/588. 01.09.2013.

Gebwell. 2022. Mitä maalämpö maksaa. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 25.09.2022]. Saatavissa: <https://gebwell.fi/maalampo/mita-maalampo-maksaa/>

Grassi, W. 2018. Heat pumps: Fundamentals and applications. [E-kirja]. [Viitattu 25.09.2022]. Saatavilla <https://link-springer-com.ezproxy.cc.lut.fi/book/10.1007/978-3-319-62199-9>

Good, N. Mancarella, P. Zhang, L. 2019. Building-to-grid flexibility: Modelling assessment metrics for residential demand response from heat pump aggregations. Applied Energy, 2019. Vol 233-234. S.709-723. ISSN 0306-2619.

Hakala, P., Kaappola, E. 2013. Kylmälaitoksen suunnittelu. 3. tarkistettu painos. Helsinki: Opetushallitus. ISBN 978-952-13-5360-4.

Helsingin kaupunki. 2022. Helsinki sallii maalämpökaivojen rakentamisen yleisille alueille ensimmäisenä Suomessa. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 24.09.2022]. Saatavissa: <https://www.hel.fi/uutiset/fi/kaupunkiymparisto/helsinki-sallii-maalampokaivojen-rakentamisen-yleisille-alueille-ensimmaisena-suomessa>

International Energy Agency. 2023. Data and statistics. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 19.03.2022]. Saatavissa: <https://www.iea.org/data-and-statistics>

International Energy Agency. 1999. Models for building indoor climate and energy simulation. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 20.04.2022]. Saatavissa: <https://www.equa.se/dncenter/T22Brep.pdf>

Jansen, B. Muller, F. 2019. Large-scale demonstration of precise demand response provided by residential heat pumps. Applied Energy, 2019. Vol 239. S.836-845. ISSN 0306-2619.

Juvonen, J. Lapinlampi, T. 2013. Energiakaivo, Maalämmön hyödyntäminen pientaloissa. Ympäristöministeriö. Ympäristöopas. Helsinki. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 24.09.2022]. Saatavissa: <https://helda.helsinki.fi/handle/10138/40953>

- Motiva. 2022a. Uusiutuvan energian RED II-direktiivi. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 19.03.2023]. Saatavissa: [https://www.motiva.fi/ratkaisut/ohjauskeinot/direktiivit/uusiutuvan\\_energian\\_red\\_ii\\_-\\_direktiivi](https://www.motiva.fi/ratkaisut/ohjauskeinot/direktiivit/uusiutuvan_energian_red_ii_-_direktiivi)
- Motiva. 2022b. Uusiutuva energia Suomessa. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 24.09.2022]. Saatavissa: [https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva\\_energia/uusiutuva\\_energia\\_suomessa](https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/uusiutuva_energia_suomessa)
- Motiva. 2020. Rakentaminen ja rakennukset. [Viitattu 09.10.2022]. Saatavissa: [https://www.motiva.fi/julkinen\\_sektori/kestavat\\_julkiset\\_hankinnat/tietopankki/rakentaminen\\_ja\\_rakennukset](https://www.motiva.fi/julkinen_sektori/kestavat_julkiset_hankinnat/tietopankki/rakentaminen_ja_rakennukset)
- Nordic Council of Ministers. 2017. Flexible demand for electricity and power. TemaNord, 2017:567. ISSN 0908-6692.
- Oilon. 2020. Lämpöpumpun asennus- ja käyttöohje. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 09.10.2022]. Saatavissa: [https://oilon.com/wp-content/uploads/2020/03/Oilon\\_kiinteist%C3%B6l%C3%A4mp%C3%B6pumppujen\\_asennus-\\_ja\\_k%C3%A4ytt%C3%B6hje\\_kaikki\\_mallit\\_FL.pdf](https://oilon.com/wp-content/uploads/2020/03/Oilon_kiinteist%C3%B6l%C3%A4mp%C3%B6pumppujen_asennus-_ja_k%C3%A4ytt%C3%B6hje_kaikki_mallit_FL.pdf)
- Partanen J. 2019a. Sähkömarkkinat, johdanto. Opetusmoniste. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. LUT ENERGIA TEKNIikka. Lappeenranta 2019.
- Partanen J. 2019b. Sähkömarkkinat, Sähkökauppa ja sähköpörssi. Opetusmoniste. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. LUT ENERGIA TEKNIikka. Lappeenranta 2019.
- Partanen J. 2019c. Sähkömarkkinat, Valtakunnallinen sähkötaseiden hallinta ja taseselvitys. Opetusmoniste. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. LUT ENERGIA TEKNIikka. Lappeenranta 2019.
- Sahlin P. 1996. Modelling and simulation methods for modular continuous systems in buildings. Väitöskirja. Kungl tekniska högskolan, building services engineering. Tukholma. ISRN KTH/IT/M—39—SE. Saatavissa: <https://www.equa.se/dncenter/thesis.pdf>
- Sosiaali- ja terveysministeriö. 2015. Sosiaali- ja terveysministeriön asetus asunnon ja muun oleskelutilan terveydellisistä olosuhteista sekä ulkopuolisten asiantuntijoiden pätevyysvaatimuksista 545/2015. 15.05.2015.

Suomen Eduskunta. 2022. Hallituksen esitys eduskunnalle laiksi sähkömakkinalain muuttamisesta ja siihen liittyviksi laeiksi. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 17.03.2023]. Saatavissa: [https://www.eduskunta.fi/FI/vaski/HallituksenEsitys/Sivut/HE\\_318+2022.aspx](https://www.eduskunta.fi/FI/vaski/HallituksenEsitys/Sivut/HE_318+2022.aspx)

Suomen Lämpöpumppuyhdistys SULPU ry. 2023. Lämpöpumppuja myytiin viime vuonna lähes 200 000 kappaletta. Kasvu 50 %. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 17.03.2023]. Saatavissa: <https://www.sulpu.fi/lampopumppuja-myyntiin-viime-vuonna-lahes-200-000-kappaletta-kasvu-50/>

Terveyden ja hyvinvoinnin laitos. 2022. Legionellaa koskeva lainsäädäntö ja ohjeistus. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 16.10.2022]. Saatavissa: <https://thl.fi/fi/web/ymparistoterveys/vesi/legionellabakteerit-vesijarjestelmissa/legionellaa-koskeva-lainsaadanto-ja-ohjeistus>

Tilastokeskus. 2021. Asumisen energiankulutus. Suomen virallinen tilasto, 2021. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 09.10.2022]. Saatavissa: [https://www.stat.fi/til/asen/2020/asen\\_2020\\_2021-12-16\\_tie\\_001\\_fi.html](https://www.stat.fi/til/asen/2020/asen_2020_2021-12-16_tie_001_fi.html)

Työ- ja elinkeinoministeriö. 2022. Sähkömarkkinat. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 15.10.2022]. Saatavilla: <https://tem.fi/sahkomarkkinat>

Ympäristöministeriö. 2022. Ilmasto- ja energiastrategia selontekona eduskuntaan – Strategia on toimintaohjelma, jolla saavutetaan hiilineutraalius 2035. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 24.09.2022]. Saatavissa: <https://ym.fi/-/1410877/ilmasto-ja-energiastrategia-selontekona-eduskuntaan-strategia-on-toimintaohjelma-jolla-saavutetaan-hiilineutraalius-2035>

Ympäristöministeriö, Rakennetun ympäristön osasto. 2012a. D2 Suomen rakentamismääräyskokoelma, Ympäristöministeriön asetus rakennusten sisäilmastosta ja ilmanvaihdosta.

Ympäristöministeriö, Rakennetun ympäristön osasto. 2012b. D3 Suomen rakentamismääräyskokoelma, Ympäristöministeriön asetus rakennusten energiatehokkuudesta. Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2010/31/EU (32010L0031); EUVLN:o L 153,18.6.2010

Ympäristöministeriö, Rakennetun ympäristön osasto. 2012c. D5 Suomen rakentamismääräyskokoelma, Ympäristöministeriön asetus rakennusten energiatehokkuudesta. Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2010/31/EU (32010L0031); EUVLN:o L 153,18.6.2010

Ympäristöministeriö, Rakennetun ympäristön osasto. 2012d. Lämpöpumppujen energialaskentaopas. 3.10.2012.



Liite 1. Case-asuinkerrostalon rakenteet, U-arvot ja käyttöajat

Wall constructions							
Name	U-value, W/(m <sup>2</sup> K)	Thickness, m					
© YMa 1010 alapohja maata vasten, lammin tila	0,1775	0,4325					
© YMa 1010 ovi, lammin tila	1,006	0,066					
© C4 2012 maapera, hiekka	1,493	1					
© YMa 1010 ulkoseina(betoni), lammin tila	0,1698	0,472					
© YMa 1010 ylapohja(betoni), lammin tila	0,09009	0,656					
© C4 2012 valipohja(betoni)	2,367	0,175					
© C4 2012 eristamaton sisaseina(ilma vali)	2,113	0,096					

Time schedules							
Name	Workdays	Saturday	Sunday	Holidays	Vacation	Mean	Yearly total
/© Always on	1	1	1	1		1	8760
/© Always off	0	0	0	0		0	0
© Kayttoaste YMa 1010, asuinkerrostalo	0,6	0,6	0,6	0,6		0,6	5256
© Laitteiden kayttoaste YMa 1010, asuinkerrostalo	0,6	0,6	0,6	0,6		0,6	5256
© Valaistuksen kayttoaste YMa 1010, asuinkerrostalo	0,1	0,1	0,1	0,1		0,1	876

Materials			
Name	Heat conduct., W/(m K)	Density, kg/m <sup>3</sup>	Specific heat, J/(kg K)
/© [Default furniture material]	0,13	1000	1300
/© [Default soil]	2	2000	1000
/© [Default ground insulation]	0,036	32	750
© C4 2012 rappauslaasti, kalkkisementtilaasti	1	1800	1000
© C4 2012 betoni	2	2400	1000
© C4 2012 mineraalivilla, levy ja matto	0,045	50	1030
© C4 2012 kipsilevy	0,21	700	1000
© C4 2012 bitumikermi	0,23	1100	1000
© C4 2012 mineraalivilla, levy (raskas)	0,045	150	1030
© C4 2012 rappauslaasti, kalkkilaasti	0,9	1700	1000
© C4 2012 Linoleum muovimatto	0,17	1200	1400
© C4 2012 kevytbetoni	0,135	500	1000
© C4 2012 solumuovilevy, paisut. polystyreeni	0,04	20	1450
© C4 2012 solumuovilevy, polyuretaani	0,033	35	1400
© C4 2012 puukuitulevy, tuulensuoja	0,07	250	1700
© tuuletettu ilmatila	2	1,2	1006
© C4 2012 solumuovipuru, polystyreenia	0,08	15	1450

Windows						
Glazing	Glazing U, W/(m <sup>2</sup> K)	Frame U, W/(m <sup>2</sup> K)	g (SHGC) T	Tvis		
[Default] © YMa 1010 ikkuna, lammin tila	1	1	0,5548	0,4408	0,721	