

Victor Holmqvist

Toimintamalli kysyntäjoustop toteuttamiseksi asuinkerrostaloissa

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (YAMK)

Talotekniikan tutkinto-ohjelma

Opinnäytetyö

12.10.2018

Tekijä Otsikko	Victor Holmqvist Toimintamalli kysyntäjoustop toteuttamiseksi asuinkerrostaloissa
Sivumäärä Aika	100 sivua + 3 liitettä 12.10.2018
Tutkinto	Insinööri (YAMK)
Tutkinto-ohjelma	Talotekniikan tutkinto-ohjelma
Ohjaajat	Yliopettaja Lauri Heikkinen Diplomi-insinööri Laura Hyttinen
<p>Opinnäytetyön aiheena oli kysyntäjoustop toteuttaminen asuinkerrostaloissa. Työn tavoitteena oli tutkia kysyntäjoustop käsitteenä käytännön näkökulmasta ja selvittää kysyntäjoustop toteuttamiseen liittyviä keskeisiä tehtäviä ja käytännön haasteita ja hankitun tiedon avulla kehittää toimintamalli kysyntäjoustop toteuttamiseksi asuinkerrostaloissa. Työhön sisällytettiin sekä sähköön että kaukolämmön kysyntäjoustop näkökulmat.</p> <p>Työ toteutettiin yleisesti konstruktiiivisen tutkimusotteen periaatteita seuraten, jonka tiedonhankinnassa hyödynnettiin sekä laadullisia että määrällisiä tutkimusmenetelmiä. Työn ensimmäiset kaksi osaa koostuvat teoreettisesta tutkimustyöstä, jossa ensimmäisessä osassa luotiin laaja yleiskuva kysyntäjoustop suhteesta energiamarkkinoihin, lainsäädäntöön ja pienkuluttajiin, ja toisessa osassa keskityttiin kysyntäjoustop toteuttamisen edellytyksiin ja järjestelmäratkaisuihin rakennustasolla. Työn kolmas osuus koostuu sekä teoreettisesta että empiirisestä tutkimustyöstä, jossa tutustuttiin lämmityksen kysyntäjoustop aiempiin tutkimus- ja mallinnusmenetelmiin ja rakennussimulointiohjelmiston (IDA ICE) avulla tutkittiin kysyntäjoustop hyödyntämistä ennalta määritetyssä tapaustudkimuskohteessa kahta kysyntäjoustopstrategiaa ja yhtä huipputehon rajoitusohjelmaa hyödyntäen.</p> <p>Työn olennaisena tuloksena syntyi toimintamalli kysyntäjoustop toteuttamiseksi asuinkerrostaloissa, jonka sisältö on myös pitkälti yleistettävissä muihin rakennustyyppeihin. Työn empiirisessä osiossa havaittiin, että huipputehon rajoitusohjelma on vartenotettava menetelmä energiakustannusten leikkaamiseksi tutkitussa kaukolämmityssä asuinkerrostalossa. Lisäksi havaittiin, että tutkitut asunnot voisivat huippukulutuksen aikana ja menetelmästä riippuen leikata hetkellistä lämmitystehoa noin 30–55 % hyväksymällä noin 1–1,5 °C:n pudotuksen sisälämpötilassa. Kaikkien menetelmien kohdalla saavutettiin yli 30 %:n leikkaus hetkellisessä lämmitystehontarpeessa asukkaiden hyväksyessä noin 1 °C:n pudotuksen asuntojen sisälämpötilassa.</p> <p>Työ tuo kokonaisuutena kysyntäjoustopista kiinnostuneelle taholle tiivistetyn yleiskuvan kysyntäjoustop toteuttamisesta asuinkerrostaloissa, toimintamallin muodossa, ja lisäksi työn raporttiosuus tukee toimintamallia hyvin kattavasti.</p>	
Avainsanat	kysyntäjoustop, asuinkerrostalo, sähköverkko, kaukolämpöverkko, HEMS, rakennussimulointi, IDA ICE

Author Title	Victor Holmqvist Operating Model for Implementing Demand Response in Apartment Buildings
Number of Pages Date	100 pages + 3 appendices 12 October 2018
Degree	Master of Engineering
Degree Programme	Building Services Engineering
Instructors	Lauri Heikkinen, Principal Lecturer Laura Hyttinen, M.Sc. (Tech)
<p>The purpose of this Master's thesis was to develop a high-level operating model to define the prerequisites and requirements for implementing demand response in apartment buildings. Both electrical grid and district heating network solutions were considered throughout the study.</p> <p>Relevant information for the development of the model was acquired with both qualitative and quantitative research methods. The theoretical part of the final year project focused on developing a high-level overview of demand response in relation to energy markets, legislation and consumers, as well as on the prerequisites and requirements for implementing demand response in, especially, apartment buildings. The project also included an empirical study implementing two demand response strategies and one peak-power limitation method to study demand response in two apartments. The study was executed with IDA ICE software.</p> <p>The project resulted in a high-level operating model for the implementation of demand response in apartment buildings, also applicable to other building types. The study established the peak-power limitation method as a feasible method for lowering heating expenses in apartments connected to the district heating network. Furthermore, the use of either demand response strategy allowed the heating power requirements for the apartments to be momentarily cut 30–55 % if a 1–1.5 °C drop in indoor temperature was accepted.</p> <p>The Master's thesis presents a comprehensive overview of demand response in buildings. Additionally, the operating model provides an overview of the key elements to examine when considering implementing demand response.</p>	
Keywords	demand response, multi-carrier, electricity grid, district heating grid, HEMS, building performance simulation, IDA ICE

Sisällys

1	Johdanto	1
2	Kysyntäjousto	5
2.1	Kysyntäjousto käsitteenä	5
2.2	Kysyntäjousto ja energiamarkkinat	11
2.3	Kysyntäjousto lainsäädännössä	16
2.4	Kysyntäjousto pienkuluttajan näkökulmasta	20
3	Kysyntäjouaston toteuttaminen rakennuksissa	23
3.1	Kysyntäjouaston ohjattavissa oleva tehopotentiaali	24
3.2	Kysyntäjouaston toteuttamisen edellytykset	26
3.3	Kysyntäjouaston järjestelmäratkaisut	31
3.4	Kysyntäjoustostrategiat	36
3.5	Kysyntäjousto asuinkerrostalossa	40
4	Lämmityksen kysyntäjouaston mallinnus ja simulointi asuinkerrostalossa	49
4.1	Aiemmat tutkimukset ja niissä käytetyt menetelmät	50
4.2	Tutkimuskohde ja tutkittavat kysyntäjoustostrategiat	54
4.3	Menetelmät ja mallinnusprosessi	55
4.3.1	Mallinnusympäristö	55
4.3.2	Rakennuksen sijainti, geometria ja sisäiset vyöhykkeet	56
4.3.3	Rakennusvaippa	57
4.3.4	Sisäilmaston tavoitearvot	58
4.3.5	Talotekniset järjestelmät ja sisäiset lämpökuormat	58
4.3.6	Ohjaus- ja säätöjärjestelmät	60
4.4	Simuloinnin toteuttaminen, kulku ja tulokset	63
4.4.1	Case 1: Tuotantoon kohdistuva ohjaus	66
4.4.2	Case 2: Vyöhykkeisiin kohdistuva ohjaus	73
4.4.3	Case 3: Huipputehon rajoitus	80
4.5	Keskeiset havainnot ja johtopäätökset	85
5	Toimintamalli kysyntäjouaston toteuttamiseksi asuinkerrostaloissa	88
6	Yhteenveto ja pohdinta	90
	Lähteet	94

Liitteet

Liite 1. Toimintamalli kysyntäjoustop toteuttamiseksi asuinkerrostaloissa

Liite 2. Energiamallinnuksen lähtötiedot

Liite 3. Kyselytutkimuksen kysymykset

1 Johdanto

Luonnonvarojen hyödyntämisessä ja energiantuotantojärjestelmissä vaikuttaa saatavilla olevan teknologian ja tietämyksen valossa edelleen esiintyvän osaoptimointia, joka saattaa johtaa ei-toivottuihin tuloksiin niin energiantuotannon järjestelmätasolla kuin maapallon keskeisellä – muun muassa resurssien tuotanto-, regenerointi- ja varastointijärjestelmän – eli elämää ylläpitävän järjestelmän tasolla. Kokonaisvaltaisen lähestymistavan hyödyntäminen kestävän yhteiskunnan rakentamiseksi vaikuttaa maailmassa vallitsevien taloudellisten uskomusjärjestelmien otteessa kuitenkin edelleen epärealistiselta vaihtoehdolta. Varsinkin mikäli toimitaan olosuhteissa, jossa osapuolet ovat jatkuvassa kilpailutilanteessa toistensa kanssa tavoitellen ikuista talouskasvua – pitkälti luonnonympäristöstä ja ihmisten hyvinvoinnista eristettyinä. Tämä näyttää ainakin osittain olevan tilanne, sillä esimerkiksi Yhdistyneiden kansakuntien tukeman TEEB-hankkeen (The Economics of Ecosystems and Biodiversity) teettämän tutkimustyön mukaan, mikään kahdestakymmenestä suurimmasta päästöjä aiheuttavista alueellisista teollisuussektoreista maailmassa eivät olisi taloudellisesti kannattavia, mikäli niiden aiheuttamat haitalliset ympäristövaikutukset olisi otettava huomioon yritystoiminnan suunnittelussa (Natural Capital at Risk: The Top 100 Externalities of Business 2013). Yhdistyneiden kansakuntien vuoden 2019 kestävän kehityksen raporttia varten laadittu tieteellinen taustadokumentti myös esittää, että nykyiset talousmallit ovat riittämättömiä kuvaamaan tämän päivän todellisuutta ja ovat pitkällä tähtäimellä kestävättömiä. Aiheen ympärillä käytävää keskustelua on myös viime aikoina kiihdyttänyt luonnon ekosysteemien odotettua nopeampi romahtaminen. (Järvensivu ym. 2018.)

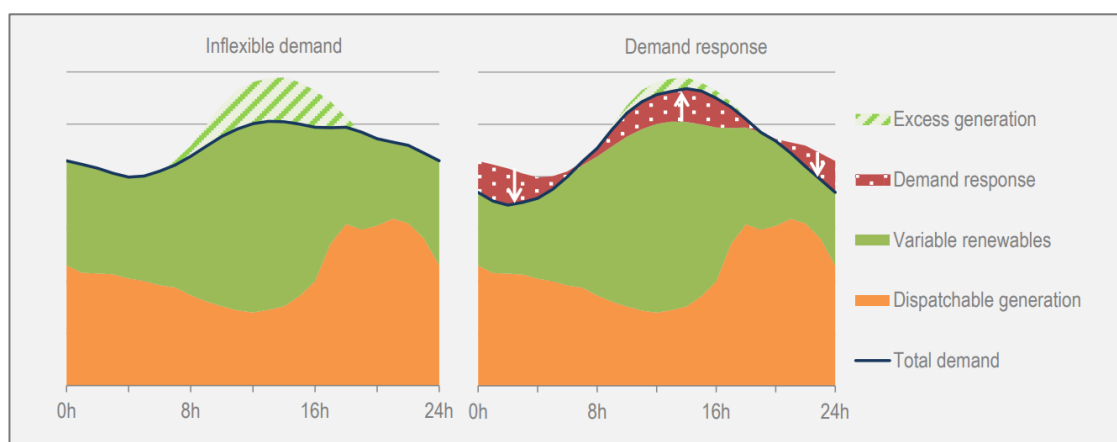
Taloudellisten uskomusjärjestelmien kestävättömyydestä huolimatta on kuitenkin todennäköistä, että kokonaisvaltaista ratkaisua tai edes ajattelutapaa kestävän yhteiskunnan rakentamiseksi ei ole ainakaan lähiaikoina muodostettavissa, mikäli keskustelut talousjärjestelmien uudistamisesta ovat vasta alussa. Samanaikaisesti ilmastonmuutos ja ekosysteemien romahtaminen vaatii ihmiskunnalta kuitenkin välittömiä toimenpiteitä, jolloin vaihtoehtoina ovat esimerkiksi nykyisten teknisten järjestelmien ja toimintatapojen parantaminen siten, että toimitaan edellä mainittuihin olosuhteisiin nähden mahdollisimman optimaalisella tasolla. Tämä on maailman energiantuotantojärjestelmien ja varsinkin sähköntuotanto- ja jakelujärjestelmien osalta mahdollista, sillä sähkömarkkinoiden yhteys kysyntäpuoleen on tavanomaiseen talousteoriaan nähden edelleen heikko. (Lampropoulos ym. 2013: 2). Tässä tapauksessa opinnäytetyössä tutkittava käsite ja

menetelmä – kysyntäjousto – voi toimia merkittävänä tekijänä tämän yhteyden vahvistamisessa, joka luo mahdollisuudet energiantuotannon optimointiin.

Kysyntäjoustossa energiantuotanto ja -kuluttajaosapuolten välille muodostetaan kommunikointiyhteys siten, että kuluttaja pystyy mukauttamaan kulutustottumuksiaan hetkeksi energiantuotannon tarpeesta. Tällä toiminnalla mahdollistetaan energiantuotanto ja jakelujärjestelmien optimointi, joka on sekä kuluttajalle että energiayhtiölle taloudellisesti hyödyllistä mutta samalla se edistää myös ympäristön hyvinvointia, kun fossiilisella polttoaineella käyvien huipputeholaitoksien käyttö vähentyy. (Järventausta ym. 2015.)

Kysyntäjousto ei kuitenkaan ole tuore ajatus, sillä sähkön kysyntäjoustoa hyödynnetään jo osittain teollisuuden puolella yksinkertaisilla ohjauksilla sekä myös asuinkeinteistöissä vaihtelevalla menestyksellä. Nyt tieto- ja viestintätekniikan viimeaikainen kehitys luo kuitenkin mahdollisuudet kysyntäjouston laajamittaisemmalle hyödyntämiselle ja lähes reaaliaikaiselle kuormanohjaukselle. (Lampropoulos ym. 2013.)

Kirjoitushetkellä kysyntäjouston edistämistä kiinteistöissä ajaa varsinkin sähköjärjestelmän osalta uusiutuvien energiamuotojen lisääntyminen energiantuotannossa, jotka eivät ole yksinkertaisin keinoin säädettävissä (Järventausta ym. 2015: 3). Tällaisessa tapauksessa energiantuottaja voi pyytää kuluttajaosapuolta mukauttamaan kulutustaan hetkeksi vastaamaan energian tuotantoa, esimerkiksi kuvan 1 mukaisesti. Kysyntäjouston keskeisiä tehtäviä ovat kulutushuippujen leikkaaminen tai siirtäminen, joiden avulla voidaan vähentää energiantuotannosta syntyviä päästöjä (Järventausta ym. 2015: 3).



Kuva 1. Sähkön kysynnän mukauttaminen vaihtelevan energiantuotannon mukaan (Digitalization and Energy 2017: 90). Vasemmalla on esitetty kysyntäkäyrä ("Total demand") ilman kysyntäjoustoa ja oikealla vastaavasti kysyntäjoustolla.

Kysyntäjouaston tarve on edellisen perusteella kasvamassa ja sen hyödyntämisaste sähköverkossa on Euroopan unionin ymmärryksen mukaan vain noin 10 prosentin tasolla (Incorporating demand side flexibility, in particular demand response, in electricity markets 2013: 3). Kysyntäjouaston potentiaali sähköverkkojen ylläpitämisessä on tällöin merkittävä ja esimerkiksi Kansainvälisen energiajärjestön arvion mukaan kysyntäjousto voisi vuonna 2040 tarjota 185 GW:n edestä kysyntäjoustoiresursseja maailman sähköjärjestelmille, mikä vastaa Australian ja Italian yhteenlaskettua kokonaissähkötehoa (Digitalization and Energy 2017: 91). Euroopan unionin kohdalla kysyntäjoustopotentiaali on arvioitu vastaavan kahden keskikokoisen jäsenvaltion kokonaissähkötehoa (Incorporating demand side flexibility, in particular demand response, in electricity markets 2013: 3). Lisäksi Suomessa myös kaukolämpöjärjestelmät voivat hyötyä kysyntäjoudesta monipuolisesti (Kaukolämmön kysyntäjousto 2015).

Työn tausta

Tämä työ tehtiin SRV Rakennus Oy:n toimeksiannosta osana REINO-hanketta, joka on Aalto-yliopiston koordinoima kehityshanke. Aalto-yliopiston lehdistötiedotteen mukaan REINO muodostuu sanoista *”rakennusten käyttäjät huomioiva esineiden internet (IoT) osana kestäviä energiasysteemejä”* ja siinä *”kehitetään älykästä joustoa asuin- ja toimistorakennusten energiankulutuksen ohjaukseen yhdessä suomalaisten yritysten kanssa”* (Syri & Kosonen 2017). Tämän työn osalta SRV Rakennus Oy:n keskeiseksi intressiksi nousi alkukeskusteluiden perusteella kaukolämmön kysyntäjouaston mahdollisuudet muun muassa huipputehon rajoituksen osalta sekä kysymykset kysyntäjouaston käytännön toteuttamiseen liittyen. Tämän perusteella laadittiin työtä ohjaava projektisuunnitelma, jonka keskeinen tavoite oli toimintamallin kehittäminen kysyntäjouaston toteuttamiseksi.

Työn tavoite ja rajaus sekä keskeiset tutkimuskysymykset

Opinnäytetyön tavoitteena on kehittää toimintamalli kysyntäjouaston toteuttamiseksi asuinkerrostaloissa tutkimalla kysyntäjoustoja käsitteenä käytännön näkökulmasta ja selvittämällä kysyntäjouaston toteuttamiseen liittyviä keskeisiä tehtäviä ja käytännön haasteita – hyödyntäen sekä kirjallisuutta että moniosaista tapaustutkimusta tiedonlähteinä.

Tapaustutkimusta lähestyttiin kolmella menetelmällä, joka koostui kyselytutkimuksesta, kysyntäjoustoan liittyvien teknologioiden käytännön kokeiluista ja rakennussimuloinnista

tilaajan ennalta määritetyissä testiasunnoissa. Tutkimuskohteiden ja teknologioiden valinnasta ja tutkimuksen liittyvistä käytännön järjestelyistä vastasi työn tilaaja ja tilaajan yhteistyökumppanit ja kohteista saadun datan käsittelystä ja analysoinnista sekä rakennussimuloinnista vastasi työn kirjoittaja. Yksi tapaustutkimuksen tavoitteista oli jäljitellä lämmityksen kysyntäjoustopa todellisessa kohteessa ja verrata saatuja tuloksia rakennussimulointiohjelmassa mallinnettuun vastaavaan tilanteeseen. Tutkimuksen toinen tavoite oli saavuttaa tietoa käyttäjän näkökulmasta testattavia teknologioita kohtaan ja yleisesti kysyntäjoustopa. Teknisistä syistä ja lyhyestä aikaikkunasta johtuen (talvijakso) kohteista kerättyä dataa koskien lämmityksen kysyntäjoustopa jäljittämistä ei saatu mukaan tähän työhön ja lisäksi kyselyiden otoskoko ja vastausaste jäivät opinnäytetyön laatimisen aikana niin pieneksi, ettei johtopäätöksiä ollut vedettävissä. Tapaustutkimus korvattiin tästä syystä osittain laajemmalla teoreettisella tutkimuksella ja rakennussimuloinnissa keskityttiin eri kysyntäjoustopastrategioihin liittyvien ilmiöiden sekä huipputehon rajoitusohjelman mahdollisuuksien tutkimiseen tapaustutkimuskohteessa.

Opinnäytetyö rajattiin otsikon mukaisesti keskittymään pääosin asuinkerrostaloihin ja lisäksi rakennussimulointi kohdistui työn tilaajan ennalta määritettyihin testiasuntoihin. Työn ohjaamiseksi laadittiin seuraavat kolme tutkimuskysymystä:

- Mitkä ovat keskeisimmät asiat, jotka tulee ottaa huomioon ryhdyttäessä optimoimaan asuinkerrostalon energiatehokkuutta ja energianhallintaa kysyntäjoustopa ratkaisujen mahdollisuuksia hyödyntäen?
- Mikä on lainsäädännön tilanne aihealueen ympärillä? Onko siinä kohtia, jotka mahdollisesti rajoittaisivat eri kysyntäjoustopa ratkaisujen tehokasta käyttöönottoa asuinkerrostaloissa?
- Millainen asuinkerrostaloon soveltuva kysyntäjoustopa ratkaisu voisi olla toteuttamiskelpoinen kustannus-, energia- ja elinkaari tehokkuuden näkökulmat huomioiden?

Menetelmät ja työn rakenne

Työ seuraa yleisluonteeltaan konstruktivisen tutkimusotteen periaatteita ja se on jaettu useaan eri osa-alueeseen, jossa hyödynnetään tutkimusmenetelminä sekä laadullisia että määrällisiä menetelmäsuuntauksia alla luetellun mukaisesti.

Ensimmäinen osa ”Kysyntäjoustopa” käsittelee kysyntäjoustopa yleisenä käsitteenä sekä pyrkii osaltaan vastaamaan kahteen ensimmäiseen tutkimuskysymykseen. Tutkimusmenetelmä on laadullinen ja siinä hyödynnetään kirjallisuutta.

Toinen osa ”Kysyntäjouaston toteuttaminen rakennuksissa” käsittelee kysyntäjouaston toteuttamisen edellytyksiä ja pyrkii osaltaan vastaamaan ensimmäiseen ja kolmanteen tutkimuskysymykseen. Tutkimusmenetelmä on laadullinen ja siinä hyödynnetään kirjallisuutta.

Kolmas osa ”Lämmityksen kysyntäjouaston mallinnus ja simulointi asuinkerrostalossa” käsittelee kaukolämmön kysyntäjouastostrategioiden tutkimus- ja mallinnusmenetelmiä sekä tapaustutkimuskohdetta, jossa rakennussimulointiohjelmistoa hyödyntäen tutkitaan lämmitystehon leikkaamista ja rajoittamista ja näiden toimenpiteiden vaikutusta kahden kerrostaloasunnon sisäilmastoon. Tutkimus koostuu sekä laadullisesta että määrällisestä tutkimustyöstä.

Neljäs osa ”Toimintamalli kysyntäjouaston toteuttamiseksi asuinkerrostaloissa” käsittelee edellä mainittujen osioiden syntetisointia toimintamallin kehittämiseksi ja kuvaa lyhyesti koko opinnäytetyön aikana käynnissä ollutta kehitysprosessia. Varsinainen toimintamalli esitetään opinnäytetyön liitteenä.

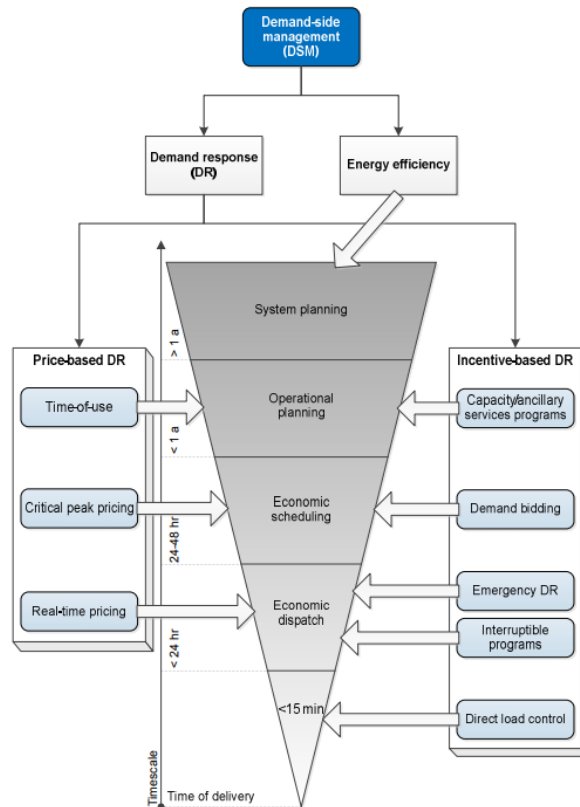
Viides osa ”Yhteenvedo ja pohdinta” käsittelee lyhyesti opinnäytetyön sisältöä ja luo yhteenvedon sen keskeisistä tuloksista sekä esittää aiheita jatkotutkimukseksi.

2 Kysyntäjousto

2.1 Kysyntäjousto käsitteenä

Kysyntäjousto tai kysynnän jousto (eng. Demand Response tai DR) on kansainvälisesti tarkasteltuna osa laajempaa kysynnän tai kuorman hallinnan käsitettä (eng. Demand Side Management tai DSM), jossa energiankäyttöä hallitaan joko pysyvien ja pitkän aikavälin toimenpiteillä, eli energiatehokkuudella (kWh), tai tilapäisten ja lyhyen aikavälin toimenpiteillä, eli kysyntäjoustolla (kW) (kuva 2). (Lampropoulos ym. 2013.) Myös muut toimenpiteet joilla tavalla tai toisella vaikutetaan energian loppukäyttöön tuotannon tarpeesta, voidaan täten katsoa lukeutuvan tähän käsitteeseen. Kirjallisuudessa edellä mainittuja käsitteitä käytetään myös vaihtokelpoisesti pääosin kysyntäjousto viitatakseen (esim. Kontu 2014; Kärkkäinen ym. 2003) mutta tilapäisten ja lyhyen aikavälin toimenpiteillä, eli kysyntäjoustolla, ei välttämättä pyritä kuitenkaan energian säästöihin

(Airaksinen ym. 2017: 1; A. T. Azar 2015: 90), joten käsitteiden erottaminen toisistaan on väärinymmärrysten välttämiseksi eduksi.

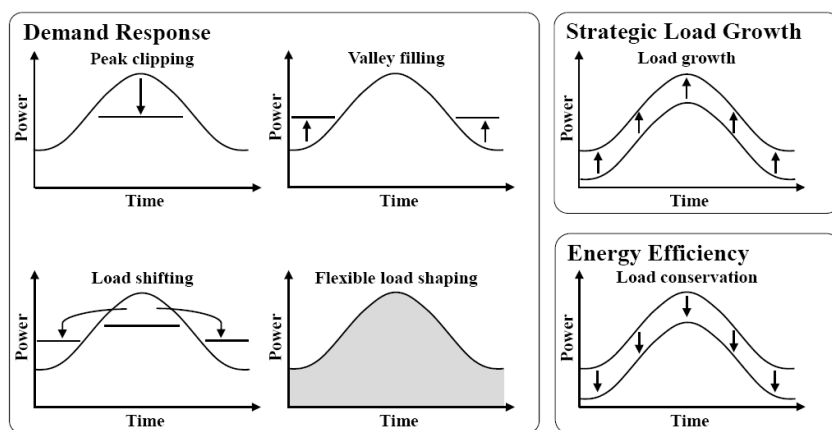


Kuva 2. Kysynnän hallinnan käsite havainnollistettuna (Baumgartner 2013: 27).

Sähköjärjestelmien osalta kysyntäjousto on liittyvää toimintaa on esiintynyt jo 1950- ja 1960-luvulla ja se on käsitteenä vakiintunut 2000-luvulla (Demand Response: The Road Ahead 2015). Perinteisesti käsite on liittynyt sähköjärjestelmiin, jossa sitä on yksinkertaisilla ohjauksilla hyödynnetty jo jonkin aikaa, myös Suomessa, mutta periaatteessa menetelmää voidaan yleisesti hyödyntää usean eri energiajärjestelmien optimoimisessa, joskin hieman eroavin tavoittein (Järventausta ym. 2015; Kaukolämmön kysyntäjousto 2015; Lampropoulos ym. 2013; Foteinaki ym. 2016). Suomessa kysyntäjousto on liittynyt kirjallisuus ja toiminta vaikuttavatkin keskittyvän suurilta osin sähköjärjestelmään (esim. Annala 2015; Bremer ym. 2017; Järventausta ym. 2015; Pahkala ym. 2017) mutta myös kaukolämpöjärjestelmän optimoimista kysyntäjousto on mahdollisuuksia hyödyntäen tutkitaan (esim. Kaukolämmön kysyntäjousto 2015; Pesola ym. 2011). Tässä työssä kysyntäjoustolla tarkoitetaan teknisestä näkökulmasta energian kysynnän hetkellistä mukautamista energiantuotannon tarpeisiin. Tämä määritelmä on tarpeen, sillä työssä käsitellään sekä sähkön että kaukolämmön kysyntäjoustoja, eli energian kysyntäjoustoja, ja

myös siksi, että kysyntäjoustore ei vaikuta kirjallisuudesta löytyvän yhdenmukaista määritelmää. Vielä laajemmin ilmaistuna kysyntäjoustore tarkoittaa siis energian kysynnän hetkellistä muuttamista energiantuotannon ja -verkkojen optimoimiseksi ja toimintavarmuuden takaamiseksi ja/tai siirtämistä kokonaan kuluttajan sekä ympäristön kannalta edullisempaan hetkeen (Kysyntäjoustore 2018; Sähköä kannattaa käyttää joustavasti 2018; Kaukolämmön kysyntäjoustore 2015). Edellisen perusteella kysyntäjoustoressa on siis pääasiallisesti kyse energiankäytön ajallisesta siirtämisestä tai muuttamisesta eikä välttämättä energian säästämisestä.

Joitain keskeisiä kysyntäjoustoreon liittyviä käsitteitä ovat energiantuotannon ja -hallinnan näkökulmasta tavat, joilla menetelmällä muokataan energian kulutuskäyrää sekä kysyntäjoustoretapahtumasta syntyvät mahdolliset jälkihuiput (Lampropoulos ym. 2013; Järventausta ym. 2015; Kaukolämmön kysyntäjoustore 2015). Kulutuskäyrien muodot riippuvat kysyntäjoustoretapahtuman toteuttamistavasta, joista yleisiä menetelmiä ovat huippukulutuksen leikkaaminen (eng. peak clipping) ja kulutuksen siirtäminen (eng. load shifting), joihin tässäkin työssä keskitytään (kuva 3). Näissä menetelmissä kulutusta vastavasti joko vähennetään hetkellisesti tai siirretään kokonaan myöhempään hetkeen. (Lampropoulos ym. 2013.) Jälkihuippu sen sijaan liittyy kysyntäjoustoretapahtuman jälkeiseen tilanteeseen, jossa energiaverkon kuormat palautuvat normaalitilanteeseensa tai perusasetusarvoihinsa. Tällöin kuormien palautuminen voi johtaa kysyntäjoustoretapahtumaa edeltävään tilanteeseen nähden suurempaan huippukulutukseen, mikä on tuotannon kannalta ongelmallista ja kysyntäjoustoren taloudellisessa mielessä jopa tappiollista (ns. negatiivinen kysyntäjoustore), sillä energian hinta voi tällöin olla merkittävästi suurempi. (Järventausta ym. 2015: 56–7, 67.) Edellä mainitut asiat voidaan ainakin käsitteinä nähdä pätevän sekä sähkön että kaukolämmön kysyntäjoustoreon.



Kuva 3. Kysynnän hallinnan keskeisiä käsitteitä. Ensimmäiset neljä vasemmalta liittyvät tarkemmin lyhyen aikavälin toimenpiteisiin, eli kysyntäjoustoon (Lampropoulos ym. 2013).

Kysyntäjoustoa tarkastellessa on myös tärkeä erottaa, etenkin taloudellisesta näkökulmasta, onko kyse implisiittisestä (myös hintaperusteisesta) kysyntäjoustosta vaiko eksplisiittisestä (myös kannustinperusteisesta) kysyntäjoustosta. Implisiittisessä kysyntäjoustossa sähkön kuluttaja seuraa energian hintoja ja mukauttaa kulutustaan sen perusteella joko manuaalisesti tai automaation avulla, ilman energiantuotannon erillistä pyyntöä. Tähän lukeutuvat esimerkiksi erilaiset tariffit. (Explicit and Implicit Demand-Side Flexibility 2016: 1.) Tänä päivänä yksittäinen kotitalous voi esimerkiksi etäluettavien sähkömittarien myötä seurata sähkön hinnan kehittymistä ja mukauttaa kulutustaan halvemmille tunneille (Kysyntäjousto 2018), eli toteuttaa jonkin tasoista implisiittistä kysyntäjoustoa. Eksplisiittisessä kysyntäjoustossa kuluttaja mukauttaa kulutustaan erillistä korvausta vastaan energiantuotannon tarpeesta. Tällöin kysyntäjousto voidaan toteuttaa kuluttajan toimesta manuaalisesti sekä myös puoliautomaattisesti tai täysin automaattisesti automaatiojärjestelmien avulla. Eksplisiittisellä kysyntäjoustolla voidaan myös käydä kauppaa avoimilla sähkömarkkinoilla. Tässä työssä keskitytään pääosin puoliautomaattiseen tai automaattiseen eksplisiittiseen kysyntäjoustoon mutta sekä implisiittinen että eksplisiittinen kysyntäjousto nähdään tarpeellisina menetelminä tulevaisuuden kysynnän hallinnassa. (Explicit and Implicit Demand-Side Flexibility 2016.)

Kysyntäjoustosta voivat hyötyä useat toimijat kuten energian tuottajat, siirtoverkkojen haltijat, energian myyjät ja energian käyttäjät sekä sitä kautta kysyntäjoustoratkaisuja mahdollistavat toimijat (Järventausta ym. 2015; Bremer ym. 2017). Hyöty on tosin vaihtelevaa (Järventausta ym. 2015: 3), ja samalla se riippuu myös energiajärjestelmän omistusrakenteesta, sillä kun sähköjärjestelmässä tuotannon, vähittäismyynnin ja jakelun tehtävät on Suomessa jaettu usean toimijoiden kesken (Suomen sähköjärjestelmä

2018) kaukolämpöjärjestelmässä kaikkia edellä mainittuja tehtäviä hoitaa pääosin kaukolämpöyhtiö (Kaukolämmön kysyntäjousto 2015: 8).

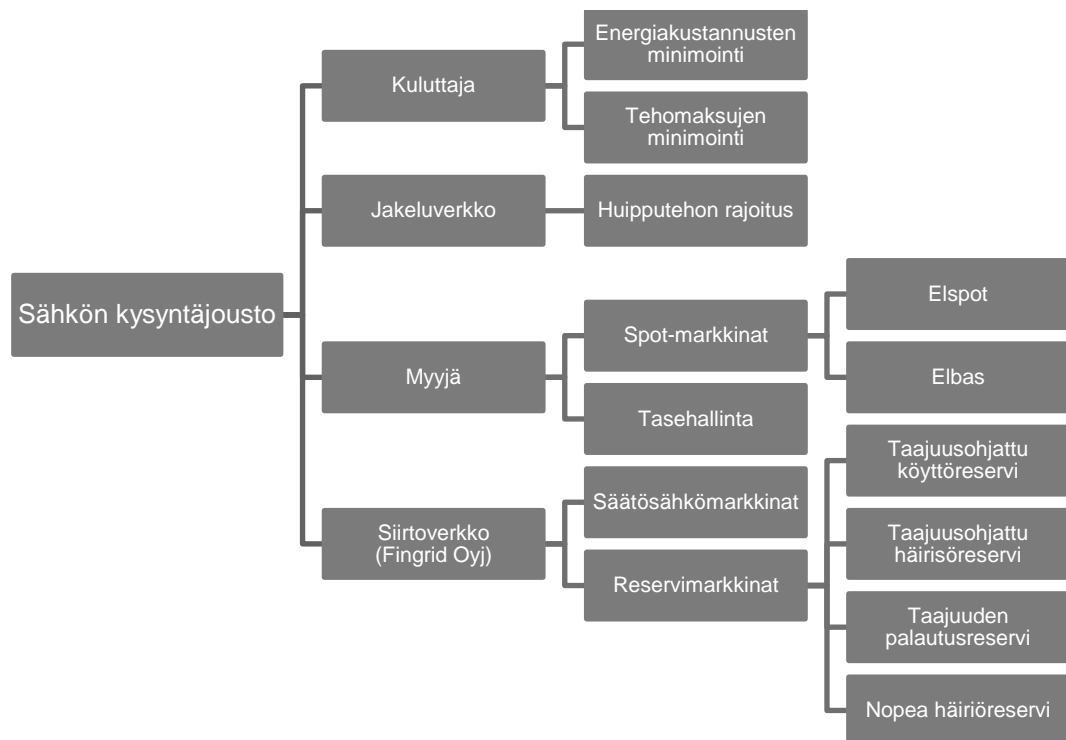
Sähkön kantaverkkoyhtiön eli Fingrid Oyj:n näkökulmasta kysyntäjousto laajentaa yhtiön työkaluja sähköverkon tehotasapainon ylläpitämisessä järjestelmävastaavan roolissa. Sen sijaan, että yhtiö hankkii kalliita ja suurpäästöisiä varavoimaloita, voi se hyödyntää markkinoilta ostettuja kysyntäjoustoiresursseja sähköverkon tehotasapainon ylläpitämiseksi. (Järventausta ym. 2015: 275–81; Bremer ym. 2017: 14–6.)

Sähkön jakeluverkkoyhtiöt mitoittavat verkkonsa perinteisesti huipputehon perusteella. Huipputehon kesto saattaa kuitenkin olla hyvin lyhyt ja yhä vaihteleva energiantuotanto tekee verkon mitoittamisesta entistäkin haastavampaa. Tässä kysyntäjousto voi toimia yhtenä komponenttina verkkojen toimintavarmuuden ja kohtuullisen mitoitustehon mahdollistajana. Uuteen tilanteeseen varautuakseen jotkut yhtiöt ovat myös ottaneet käyttöön tehokomponentin hinnoittelussaan, mikä luo tarvetta huipputehojen tarkastelemiseen kuluttajien keskuudessa. (Järventausta ym. 2015: 275–81; Bremer ym. 2017: 14–6.) Myös alan suosituksissa tehokomponenttien käyttöön ottaminen sähkön hinnoittelussa nähdään tärkeänä osatekijänä kysyntäjouston edistämiseksi (Honkapuro & Auvinen 2016).

Sähkön vähittäismyyjät voivat hyödyntää kysyntäjoustoiresursseja oman tasehallinnan ylläpitämiseksi sekä liiketoimintansa kehittämiseksi. Kysyntäjouston avulla myyjät voivat myös kehittyä kysyntäjouston palvelutoimittajiksi tarjoamalla kysyntäjoustoproteknologiaa osana sähkösopimuksia ja niin osa on jo alkanut tehdä. Kysyntäjouston toteuttaminen vaatii kuitenkin rakennusten teknisten järjestelmien syvällistä osaamista ja onkin mahdollista, että erilaisten teknisten ratkaisujen tarjoajat ja sähkön vähittäismyyjien yhteistyö tulee tulevaisuudessa kehittymään. (Järventausta ym. 2015: 3, 275–81; Bremer ym. 2017: 14–16.)

Kuluttajan näkökulmasta kysyntäjousto tuo useita hyötyjä sekä sähköjärjestelmän että kaukolämpöjärjestelmän osalta. Sen lisäksi että kuluttaja hyötyy siitä pienentyneiden energiakustannusten ja energiankäytön optimoinnin kautta, se antaa myös kysyntäjouston toteuttamiseen tarvittavien ohjausjärjestelmien myötä enemmän mahdollisuuksia hallita kodin sähkö- ja lämmityslaitteita monipuolisesti. Kuluttaja pystyy myös toiminnallaan auttamaan huipputeholaitoksien käytön vähentämisessä ja sitä kautta osallistumaan ympäristön hyvinvoinnin ylläpitoon. (Bremer ym. 2017: 4, 32; Kaukolämmön kysyntäjousto 2015: 15.)

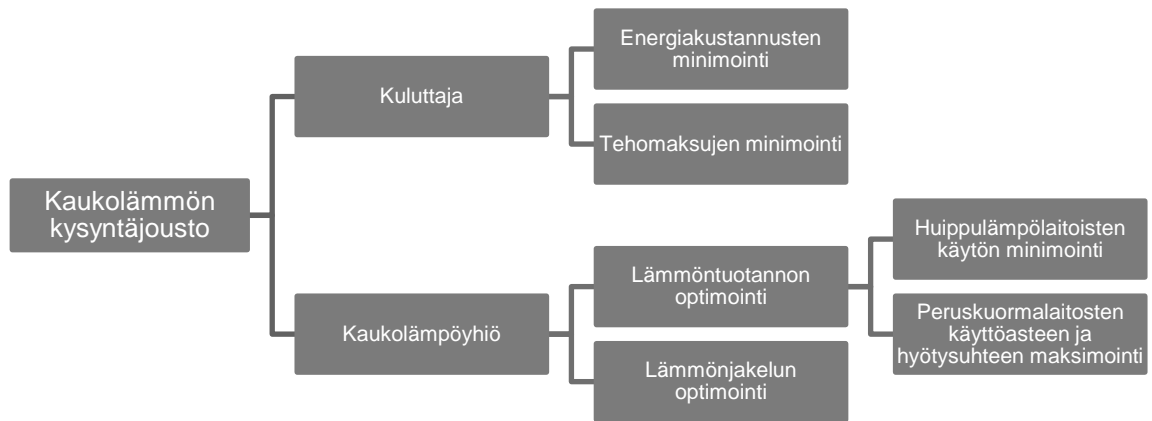
Kuvassa 4 on esitetty eri käsitteiden yhteyksiä ja kysyntäjoustopuomien hyötyjä eri osapuolille sähköverkon osalta.



Kuva 4. Havainnointi sähkön kysyntäjoustopuomien yhteyksistä ja hyödyistä eri osapuolille (mukautettu Järventausta ym. 2015: 24).

Kaukolämpöyhtiön kannalta kysyntäjoustopuomien hyödyt ovat monimuotoiset ja riippuvat kaukolämpöjärjestelmän rakenteesta – yleistäminen on täten kaukolämpöjärjestelmien osalta haastavaa, sillä järjestelmät eroavat usein selkeästi toisistaan. Yleisesti hyödyt syntyvät kuitenkin tuotannon hyötysuhteen parantamisesta, huippulämpölaitosten käytön minimoimisesta ja tasapainoisesta kaukolämpöverkosta. Huomionarvoista on myös se, että huippulämpölaitoksissa käytetään tavanomaisesti polttoöljyä ja että niiden käyttö on parhaassa tapauksessa nollakatteista sekä usein myös tappiollista. (Kaukolämmön kysyntäjoustopuom 2015.) Tässä tapauksessa kysyntäjoustopuomien tuoma hyöty sekä talouden että ympäristön hyvinvoinnin kannalta on selkeä.

Kuvassa 5 on esitetty eri käsitteiden yhteyksiä ja kysyntäjoustopuomien hyötyjä eri osapuolille kaukolämpöverkon osalta.



Kuva 5. Havainnointi kaukolämmön kysyntäjouston eri käsitteiden yhteyksistä ja höydyistä järjestelmän eri osapuolille (mukautettu Kaukolämmön kysyntäjousto 2015: 15).

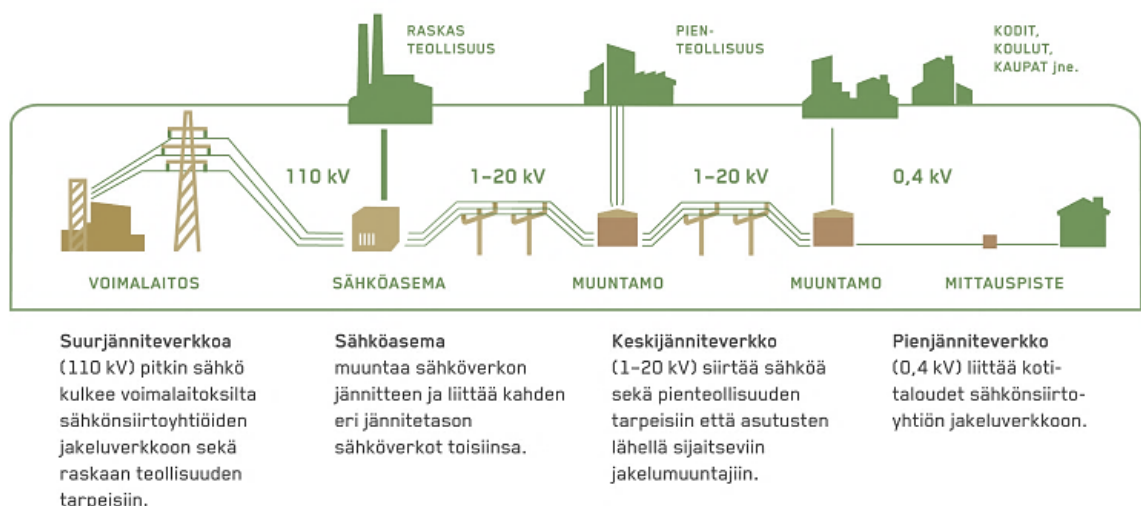
Kysyntäjouston mahdollistajana on yllä mainittujen toimijoiden lisäksi visioitu uusi palveluntarjoaja: niin kutsuttu aggregaattori. Aggregaattorin rooli kysyntäjouston edistämisessä on koota useiden pienempien energiankuluttajien resursseja kokonaisuudeksi, jolla on mahdollista käydä kauppaa, sillä yksittäisen kuluttajan resurssit ovat usein liian pieniä tarjottavaksi energiamarkkinoilla. (Pahkala ym. 2017.) Tällöin aggregoidulle kuormalle käytetään myös nimikettä virtuaalinen voimala (A. T. Azar 2015: 136). Varsinkin kaukolämpöjärjestelmässä onnistunut kysyntäjoustopahtuma vaatii yksittäistä kiinteistöä suurempia resursseja (Kaukolämmön kysyntäjousto 2015: 13). Koska aggregaattori on myös visioitu toimivan markkinoiden ja kuluttajien välisenä asiantuntijana, luonteva toimija tähän tehtävään on sähkön myyjä mutta myös täysin itsenäinen aggregaattori on mahdollinen. Aggregaattorin tarkkaa tehtäväkuvausta ja vastuuta ei ole vielä ainakaan lainsäädännöllisesti määritetty. (Pahkala ym. 2017: 23–4.)

2.2 Kysyntäjousto ja energiamarkkinat

Rakennuksen tekniset ratkaisut ja mahdollisuudet osallistua kysyntäjousto on osittain sidoksissa energiamarkkinoiden vaatimuksiin (Järventausta ym. 2015: 43–4). Varsinkin sähkön kysyntäjouston toteuttaminen vaatii koko energiajärjestelmän tarkastelemista aina markkinapaikasta ohjattavaan kuormaan asti. Fingrid Oyj:n mukaan kysyntäjousto voi osallistua sähkömarkkinoihin siinä missä tuotantoresurssitkin (Kysyntäjousto 2018), joten tässä osiossa tutkitaan energiamarkkinoiden rakennetta lyhyesti.

Suomen sähköjärjestelmä koostuu sähkön tuotannosta, sähkön siirrosta ja sähkön lopputähtästä (kuluttajista) ja on se osa pohjoismaista sähköjärjestelmää johon kuuluvat

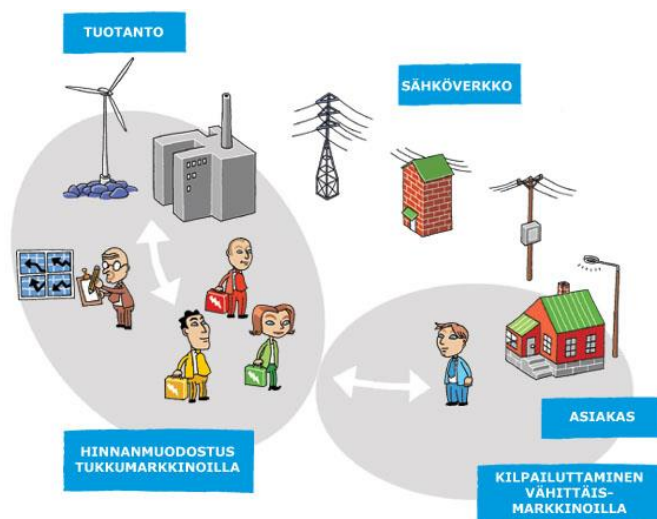
Ruotsi, Norja ja Itä-Tanska. Edellä mainittu kokonaisuus on tasasähköyhteydellä kytketty Keski-Euroopan sähköjärjestelmään ja lisäksi Suomella on tasasähköyhteydet Venäjän ja Viron ja sitä kautta Baltian sähköjärjestelmiin. Sähköä tuotetaan pääsääntöisesti suurilla voimalaitoksilla, mistä sähkö siirretään kantaverkkoon ja siitä edelleen alue- ja jakeluverkkoihin, josta loppukäyttäjät saavat sähkönsä. (Suomen sähköjärjestelmä 2018.) Suomen kantaverkon omistaja Fingrid Oyj vastaa verkon ylläpidosta ja toimii sähkömarkkinalain (588/2013) mukaisena järjestelmävastaavana – lisäksi alue- ja jakeluverkoista vastaavat useat yritykset, joita kutsutaan [Fingrid Oyj mukaan lukien] verkonhaltijoiksi. Sähkön loppukäyttäjät eivät voi vaikuttaa oman sähköliittymänsä jakeluverkkohaltijan valintaan, sillä jakeluverkkoyhtiön valinta määräytyy sähkön käyttöpaikan maantieteellisen sijainnin perusteella, jolle yhtiöllä on energiaviraston myöntämä verkkolupa ja yksinoikeus – eli alueellinen monopoliasema. Verkkoluvan myötä jakeluverkkoyhtiölle kuuluu samalla sähkömarkkinalain (588/2013) mukaiset velvollisuudet kyseisen maantieteellisen alueen osalta. (Alan toimijat 2018.) Suomen sähkönsiirron toimitusketju on havainnollistettu kuvassa 6.



Kuva 6. Sähkönsiirto havainnollistettuna (Sähkönsiirto N.d.).

Valtakunnallisen sähköjärjestelmän toimivuuden kannalta on ensiarvoisen tärkeätä, että sähkön tuotanto seuraa sähkön kulutusta – toisin sanoen sähkön tuotanto ja kulutus tulee joka hetki olla tasapainossa. Tämän vuoksi kaikkien sähkömarkkinaosapuolten vastuihin kuuluu sähköverkon tasapainon ylläpitäminen, eli tasevastuu. (Sähkömarkkinat 2018.) Suomen sähkömarkkinat avattiin ensimmäistä kertaa kilpailulle vuonna 1995 mutta pienimmät sähkönkäyttäjät liittyivät käytännössä markkinoille vasta teknisten jär-

jestelmien kehittyessä vuonna 1998 (Partanen ym. 2014: 2). Tänä päivänä sähkön tuotannosta käydään pääsääntöisesti kauppaa tukkumarkkinoilla, josta muun muassa sähkön vähittäismyyjät ostavat sähkönsä ja tarjoavat sitä edelleen asiakkailleen (kuva 7). Kaupankäynnin mahdollistajana toimii pohjoismaiden Nord Pool sähköpörssi, jossa varsinaiseen sähkön toimitukseen johtavat kaupat käydään Spot-markkinoilla, niin kutsuilla Elspot- ja Elbas-markkinoilla tai vastaavasti myös Day-ahead- ja Intraday-markkinoilla (The power market 2018; Partanen ym. 2014). Spot-markkinoista Elspot toimii pääasiallisena markkinapaikkana, johon Elbas on luotu jälkimarkkinana poikkeustilanteiden hallintaan. Elspot-markkinoilla kauppaa käydään vuorokauden sisällä suljetussa huutokauppapörssissä, jossa kaupankäynnin osapuolet jättävät tarjouksensa viimeistään kello 13.00. Tarjous sisältää tarjouksen seuraavan päivän käyttötunneista (00–23). Elbas-markkinoilla kauppaa käydään päivän sisällä ja tarjoukset annetaan viimeistään tuntia ennen toimitusta, joka mahdollistaa edellisen päivän korjaavien kauppojen tekemisen esimerkiksi kauppiaan oman taseen ylläpitämiseksi. (Partanen ym. 2014.) Elbas-markkinoilla tapahtuva kaupankäynti on Elspot-markkinoita selkeästi pienempää eikä tarjouksille aina löydy vastatarjoajaa, mikä voi rajoittaa Elbas-markkinoiden hyödyntämistä kauppiaan omassa tasehallinnassa. Tässä kysyntäjoustoresurssit voivat toimia sähkömarkkinoiden kautta hoidetun tasehallinnan mahdollisena korvaajana. (Järventausta ym. 2015: 46.)



Kuva 7. Sähkön toimitusketju havainnollistettuna (Sähkömarkkinat N.d.).

Sähköstä käydään kauppaa myös sähköpörssin ulkopuolella, jolloin puhutaan OTC-markkinoista, johon lukeutuvat muun muassa tase- ja säätösähkö. Tasapainoinen säh-

köjärjestelmä, jossa tuotannon ja kulutuksen välinen suhde on kaikkina aikoina tasapainossa ja sähkönkulutus ennustettavissa, on kaikkien sähkömarkkinoilla toimivien eduksi. Tämä ei tavallisesti ole mahdollista ja ennusteet ovat aina joko yli- tai alijäämiä, mikä luo edellytykset tasehallinnalle, jota hoidetaan tasesähköllä niin kutsuttujen avoimien toimittajien kautta. Avoimella toimittajalla pyritään varmistamaan, että sähköä toimitetaan aina todellisen kulutuksen mukaan. (Partanen ym. 2014.) Tasesähkön lisäksi valtakunnallisen sähköverkon käyttötunnin aikaisen tehotasapainon ylläpitämiseksi verkon järjestelmävastaava (Fingrid Oyj) käyttää hyödykseen niin kutsuttuja reservejä, joita eri toimijat voivat muun muassa tarjota järjestelmävastaavan ylläpitämille säätösähkömarkkinoille (mFRR) sekä mahdollisesti myös muille reservimarkkinoille kuten taajuusohjatut käyttö (FCR-N)- ja häiriöreservit (FCR-D). Säätösähkömarkkinoilla (mFRR) tarjoukset tulee saapua Fingrid Oyj:lle vähintään 45 minuuttia ennen käyttötunnin alkua ja tarjottavat resurssit tulee olla käytettävissä 15 minuutin kuluessa tilauksesta sekä reaaliaikaisesti todennettavissa. Tarjoukset ovat joko ylössäättotarjouksia, joissa tuotantoa lisätään tai kulutusta vähennetään, tai alassäättotarjouksia, jossa tuotantoa vähennetään tai kulutusta lisätään. Huomattavaa on, että tarjottavia resursseja tulee olla vähintään 5 MW:n edestä (mikäli käytössä on elektroninen aktivointi, muuten 10 MW), joten yksittäinen kotitalous ei tavanomaisesti voi itsenäisesti osallistua säätösähkömarkkinoille jo tämä rajoituksen perusteella. (Sähkömarkkinat 2018; Pahkala ym. 2017: 23.)

Kysyntäjoustop markkinapaikat ovat edellisen perusteella yksinkertaistettuna:

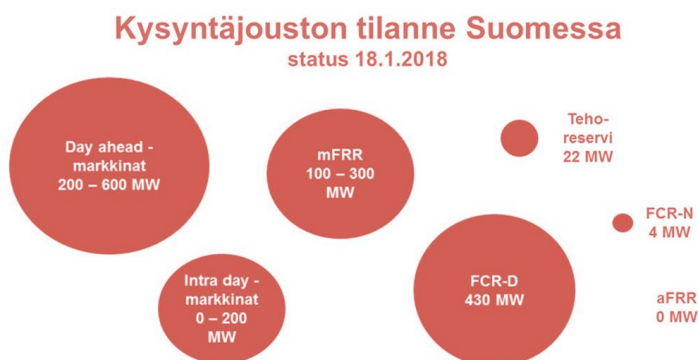
- vuorokausimarkkinat (Elspot/Day-ahead)
- päivän sisäiset markkinat (Elbas/Intraday)
- säätösähkömarkkinat
- reservimarkkinat.

Kysyntäjoustop markkinapaikat ja niiden asettamat vaatimukset on esitetty tarkemmin taulukossa 1.

Taulukko 1. Sähkön kysyntäjouaston markkinapaikat (Kysyntäjousto 2018).

Tuote	Sopimus- tyyppi	Minimi- tarjous- koko	Markkinapaikan sulkeutumis- ajankohta	Aktivoituminen	Aktivoituu
Taajuusohjattu käyttöreservi (FCR-N)	Vuosi- ja tunti- markkinat	0,1 MW	Vuosimarkkinat edellisvuoden syksyllä, tuntimarkkinat D-1 klo 18:30	Lineaarisesti välillä 50,1 - 49,9 Hz, 0,1 Hz muutos 100 % 3 min	Useita kertoja tunnissa
Taajuusohjattu häiriöreservi (FCR-D)	Vuosi- ja tunti- markkinat	1 MW	Vuosimarkkinat edellisvuoden syksyllä, tuntimarkkinat D-1 klo 18:30	Voimalaitokset: lineaarisesti välillä 49,9 - 49,5 Hz kun f alle 49,5 Hz 50% 5s ja 100% 30s	Useita kertoja vuorokaudessa
			Vuosimarkkinat edellisvuoden syksyllä, tuntimarkkinat D-1 klo 18:30	Relekytketyt kuormat: vaihtoehtoisesti 49,7 Hz 5s TAI 49,6 Hz 3s TAI 49,5 Hz 1s	Muutaman kerran vuodessa
Automaattinen taajuudenhallintareservi (aFRR)	Tuntimarkkinat	5 MW	D-1 klo 17:00	FG:n lähettämän tehopyyntisignaalin mukaisesti, 100% 2 min	Useita kertoja vuorokaudessa
Säätösähkömarkkinat (mFRR)	Tuntimarkkinat	5 MW	45 min ennen käyttö-tuntia	100% 15 min	Tarjouksen ja säätötarpeen mukaisesti
Säätökapasiteettimarkkinat (mFRR)	Viikkomarkkinat	5 MW	Edellisviikon tiistaina klo 12:00	100 % 15 min	Tarjouksen ja säätötarpeen mukaisesti
Vuorokausimarkkina (Elspot **)	Tuntimarkkinat	0,1 MW	D-1 klo 13:00	12 h	-
Päivän sisäinen markkina (Elbas) **)	Tuntimarkkinat	0,1 MW	30 min ennen käyttö-tuntia	1 h	-
Tehoreservi ***)	Pitkäaikainen	10 MW	-	15 min kuormille, 12 h voimalaitoksille	Harvoin
*) Korvaustason hinnat ovat viitteellisiä, tarkemmat ehdot ja hinnoitteluperiaatteet löytyvät kuhunkin markkinapaikkaan liittyvistä sopimuksista.					
**) Nord Pool					
***) Energiavirasto					

Periaatteessa yksinkertaisimmat markkinat ovat vaatimusten osalta vuorokausi- ja päivän sisäiset markkinat ja haastavimmat ovat reservimarkkinat. Käytettävissä olevien kysyntäjoustoressurssien soveltuvuudelle eri markkinapaikoille ei kuitenkaan ole vedettävissä selkeätä linjaa, vaan resurssien soveltuvuutta kuhunkin markkinapaikkaan tulee arvioida aina tapauskohtaisesti (Järventausta ym. 2015: 52–4). Esimerkiksi sähkölämmitteiset omakotitalot on arvioitu soveltuvan hyvin Elspot-markkinoille (Järventausta ym. 2015: 52–4) mutta niitä on myös onnistuneesti testattu häiriöreservi- ja säätösähkömarkkinoilla (Kysynnänjouaston pilottiprojekti 2016). Kysyntäjouaston tämän hetkiset hyödyntämistasteet eri markkinoilla on esitetty kuvassa 8.



Kuva 8. Sähkön kysyntäjoustomarkkinoiden tilanne 18.1.2018 (Kysyntäjousto 2018).

Sähkömarkkinat ovat kuitenkin kirjoitushetkellä läpikäymässä jonkin tasoisen murroksen, joten kysyntäjousto ja sähkömarkkinat kehittyvät jatkuvasti (Auvinen ym. 2018: 15). Yksi lähiaikoina tuleva muutos on sähkön vähittäismarkkinoita ja sähkömyyjää ja jakeluverkkoyhtiöitä yhdistävä Fingrid Oyj:n Datahub-järjestelmä, jonka tarkoitus on muun muassa selkeyttää markkinoilla toimimista ja yksinkertaistaa kuluttajan mahdollisuuksia vaihtaa sähkösopimustaan (Datahub - kohti keskitettyä tiedonvaihtoa N.d.).

Suomessa kaukolämmöllä ei sähköjärjestelmän tapaan ole ainakaan tällä hetkellä olemassa avoimia markkinoita vaan kysyntäjoustoon liittyvät vaatimukset ja mahdolliset kannustimet määrittelee lähinnä paikallinen kaukolämpöyhtiö. Kuitenkin myös kaukolämpöteollisuus on läpikäymässä jonkin tasoisen murroksen, jossa kaukolämpöverkko on muuttumassa enenevässä määrin kaksisuuntaiseksi (lämpöä myydään ja ostetaan) ja uusia hinnoittelumalleja tutkitaan ja kehitetään (Kaksisuuntaisen kaukolämmön liiketoimintamallit 2016). Esimerkiksi Suomen kaukolämpöyhtiöistä Fortum ostaa jo hukkalämpöä avoimin hinnoin (Avoin kaukolämpö ostohinnat N.d.) ja ainakin Ruotsissa löytyy jo esimerkki, jossa hukkalämpöä ostetaan markkinahintaan (Dagens pris 2018).

2.3 Kysyntäjousto lainsäädännössä

Euroopan unionin ilmastopolitiikka lisää tarvetta kysyntäjoustolle, sillä unioni on sitoutunut vähentämään kasvihuonepäästöjä, parantamaan energiatehokkuutta ja lisäämään uusiutuvan energian osuutta energiantuotannossaan (Cederlöf 2013). Näistä tavoitteista uusiutuvan energian lisääminen ja kasvihuonepäästöjen vähentäminen ovat vahvimmin yhteyksissä kysyntäjouston tarpeeseen, sillä kuten on jo aikaisemmin mainittu, uusiutuvan energian tuotanto lisää tarvetta joustolle ja joustolla voidaan välttyä huipputeholaitoksien käynnistämisestä.

Vuoteen 2020 mennessä Euroopan unioni tähtää 20 prosentin kasvihuonepäästöjen vähentämiseen [vuoden 1990 tasosta], 20 prosentin energiatehokkuuden parantamiseen [verrattuna vuonna 2007 arvioituun kehityspolkuun] ja 20 prosentin uusiutuvan energian käyttöön [energian loppukulutuksesta]. Vuoden 2030 tavoitteet ovat vastaavasti 40-, 27- ja 27 prosenttia ja uusia tavoitteita asetetaan nykyisen strategian mukaan aina vuoteen 2050 asti. (Cederlöf 2013.)

Suomessa on juuri valmistunut mittava rakentamismääräysten vaiheittainen uudistus, joka käynnistyi vuonna 2013 voimaan astuneen maankäyttö- ja rakennuslain yhteydessä. Viimeisimmät uudistukset astuivat voimaan 1.1.2018 ja tällöin määräysten esitystapaa päivitettiin siten, että suosituksina annettavat ohjeet poistettiin kokonaisuudessaan ja vaatimusten määrää vähennettiin lähes puoleen. Ilmoitusten mukaan rakentamisen laatuvaatimukset eivät tästä huolimatta kuitenkaan heikentyneet. (Lehtinen 2017.) Tällä hetkellä kysyntäjousto esiintyy sähkönkäytön osalta Euroopan unionin direktiiveissä ja sitä kautta Suomen kansallisessa lainsäädännössä ja rakentamismääräyksissä. Kaukolämmön osalta ei tutkimuksen aikana löydetty kysyntäjoustoon viittaavaa lainsäädäntöä.

Rakennusten energiatehokkuusdirektiivin (2010/31/EU) johdanto-osion kappaleessa 4 otetaan välillisesti kantaa kysyntäjoustoon mainitsemalla, että:

Energian kysynnän hallinta on tärkeä väline, jonka avulla unioni voi vaikuttaa maailmanlaajuisiin energiamarkkinoihin ja siten energian toimitusvarmuuteen keskipitkällä ja pitkällä aikavälillä (Direktiivi 2010/31/EU 2010).

Direktiivissä viitataan siis kysynnän hallintaan (eng. Demand-side management), joka on aiemmin käsitellyn aineiston mukaisesti kysyntäjoustoa laajempi käsite, johon kuuluu myös energiatehokkuuden pitkän aikavälin parantaminen kysynnän hallitsemiseksi, eikä nimenomaisesti kysyntäjousto.

Rakennusten energiatehokkuusdirektiivin päivitetty versio (2018/844) julkaistiin tämän työn aikana, missä otetaan selkeästi kantaa kysyntäjoustoon edistämiseen rakentamisen tasolla. Yksi keskeinen kysyntäjoustoon liittyvä päivitys ja direktiivissä täysin uusi käsite on rakennuksen älyratkaisuvalmiutta koskevan indikaattorin (eng. Smart Readiness Indicator tai SRI) käyttöön ottaminen 31. joulukuuta 2019 mennessä. Indikaattori olisi tois- taiseksi vapaaehtoinen ja se perustuisi ainakin seuraavien ominaisuuksien mittaami- seen:

- a) kyky ylläpitää energiatehokkuutta ja rakennuksen toimintaa mukauttamalla energiankulutusta esimerkiksi uusiutuvista lähteistä peräisin olevan energian käytöllä;
- b) kyky mukauttaa toimintatapaansa asukkaan tarpeiden mukaan kiinnittäen samalla asianmukaisesti huomiota käyttäjäystävällisyyteen, terveellisten sisäilmasto-olosuhteiden ylläpitoon ja kykyyn raportoida energiankäytöstä; ja
- c) rakennuksen **kokonaissähkökysynnän joustavuus**, mukaan lukien sen kyky mahdollistaa osallistuminen aktiiviseen ja passiiviseen sekä epä-suoraan ja suoraan kysynnänohjaukseen verkon osalta, esimerkiksi joustavuuden ja kuormituksen jakamiskyvyn ansiosta. (Direktiivi 2018/844 2018.)

Direktiivin (2018/844) suoria velvollisuuksia ovat suurehkojen, muiden kuin asuinrakennusten, varustaminen automaatio- ja ohjausjärjestelmillä. Tämä tulisi tehdä vuoteen 2025 mennessä, mikäli se on teknistaloudellisesti perusteltavissa. Lisäksi asuinrakennusten kohdalla ehdotetaan käyttäjälähtöisten energianseuranta- ja optimointipalveluiden edistämistä. Muita kysyntäjoustopuoliin liittyviä velvollisuuksia ovat autojen sähkölatauspisteiden asentaminen. Yksinkertaistettuna muiden kuin asuinrakennusten kohdalla direktiivi velvoittaa sähkölatauspisteiden asentamista, mikäli rakennuksessa on enemmän kuin kymmenen pysäköintipaikka ja kaikkien rakennusten (myös asuinrakennusten) kohdalla olisi asennettava putkitus joka viidenteen pysäköintiruutuun, eli varaus sähkökaapeleita varten, mikäli rakennuksessa on yli kymmenen pysäköintipaikkaa.

Energiatehokkuusdirektiivissä (2012/27/EU) otetaan suoraan kantaa kysyntäjoustopuoliin edistämiseen asettamalla jäsenvaltioille selkeitä vaatimuksia muun muassa siirto- ja jakelutariffeja koskien. Nämä vaatimukset ilmastaan tiivistä direktiivin 15 artiklan kohdassa 4 seuraavasti:

Jäsenvaltioiden on varmistettava, että poistetaan sellaiset siirto- ja jakelutariffeihin sisältyvät kannustimet, jotka ovat haitallisia sähkön tuotannon, siirron, jakelun ja toimituksen kokonaistehokkuudelle (myös energiatehokkuudelle) tai jotka voivat haitata kysyntäjoustopuoliin mukanaoloa markkinoiden tasapainottamisessa ja lisäpalvelujen hankinnassa. Jäsenvaltioiden on varmistettava, että verkonhaltijoita rohkaistaan tehostamaan infrastruktuurin rakennetta ja toimintaa ja että direktiivin 2009/72/EY puitteissa tariffit suovat toimittajille mahdollisuuden edistää kansallisia olosuhteista riippuen kuluttajien osallistumista järjestelmän tehokkuuteen, mukaan lukien kysyntäjoustopuoliin. (Direktiivi 2012/27/EU 2012.)

Lisäksi energiatehokkuusdirektiivissä otetaan kantaa energia-alan sääntelyviranomais- ten sekä sähköverkkojen haltijoiden toimintaan siten, että kysyntäjoustopuoliin kehitys ei näiden toimesta esty muista kuin mahdollisista teknisistä rajoitteista johtuen (Direktiivi 2012/27/EU 2012: 15 artiklan 8 kohta).

Kuten energiatehokkuusdirektiivissä (2012/27/EU) viitataan, myös sähkömarkkinadirektiivi (2009/72/EY) ottaa kantaa kysyntäjousto. Direktiivissä määritellään siirtoverkonhaltijoiden tehtäviä, johon kuuluu muun muassa vastuu varman, luotettavan ja tehokkaan sähköverkon ylläpitämisestä missä kaikki tarvittavat lisäpalvelut, kuten kysyntäjousto, ovat myös saatavilla (Direktiivi 2009/72/EY 2009: 12 artiklan d alakohta).

Suomen kansallisen lainsäädännön osalta kysyntäjousto otetaan suoraan kantaa työ- ja elinkeinoministeriön asetuksessa kantaverkonhaltijan järjestelmävastuusta 635/2013 sekä sähkömarkkinalain muutoksella 1430/2014. Nämä säädökset edustavat käytännössä edellä mainittujen direktiivien täytäntöönpanoa.

Euroopan unionin direktiivien ja sitä kautta Suomen kansallisen lainsäädännön puolesta vaikuttaa siltä, että kysyntäjousto ei ole asetettu mitään tarkoituksenmukaisia esteitä vaan säädöksillä pyritään edistämään kysyntäjouston kehittymistä ja käyttöönottoa sekä ohjaamaan jäsenvaltioita purkamaan sellaisia säädöksiä ja toimintatapoja, jotka mahdollisesti estäisivät tai hidastaisivat tämän toteutumista.

Vaikka lainsäädännöllisiä esteitä kysyntäjouston toteuttamiselle ei näytä olevan, aiheeseen liittyvässä kirjallisuudessa nostetaan kuitenkin esiin selkeitä lainsäädännöllisiä kehitystarpeita sekä rakentamisen että sähkömarkkinoiden liittyvien säädösten osalta. Sorri ym. (2016) mainitsee, että vaikka Suomen rakentamismääräykset kannustavat energiatehokkaiden rakennusten rakentamiseen, niissä ei tällä hetkellä oteta kantaa kysyntäjousto liittyviin tarpeisiin kuten energian käyttöprofiilien ja huipputehojen tarkasteluun. Lisäksi Sorri ym. (2016) esittää, että vaikka säädökset eivät ole ainoa tapa vaikuttaa kysyntäjouston edistämiseen, energiatehokkuuden ja -kulutuksen tarkastelun rinnalle olisi syytä tuoda rakennuksen käyttöprofiilin ja huipputehon tarkastelun.

Demos Helsingin työ- ja elinkeinoministeriölle tekemässä selvityksessä esitetään myös lainsäädännön kehitysehdotuksia sekä kolme skenaariota kysyntäjouston tulevaisuudelle (Bremer ym. 2017). Nämä ovat tässä työssä laadittavan toimintamallin jatkokehittämisen suhteen mainitsemisen arvioisia, sillä työ- ja elinkeinoministeriölle kuuluvat esimerkiksi kysyntäjoustomarkkinoiden sääntelyyn liittyvä toiminta (Harsia ym. 2017). Selvityksessä esitetyt skenaariot ovat 1) huomaamaton uuden teknologian ajama muutos; 2) tasapuolinen markkinaehtoinen muutos paljon kuluttavien johdolla; tai 3) näkyvä ja laaja säädöksillä ohjattu muutos.

Ensimmäisessä skenaariossa (1), eli huomaamattomassa uuden teknologian ajamassa muutoksessa, on kyse pääosin markkinaehtoisesta muutoksesta, jossa sääntelyn osuus on vähäistä – tämä edustaakin kysyntäjoustopotentialin edistämisen tämänhetkistä tilannetta. Tässä skenaariossa erilaiset kotiautomaatiota ja muita asumisen kokonaispalveluita tarjoavat yritykset tarjoavat kysyntäjoustopotentialia muiden palveluiden ohella ja ratkaisuja kehitetään ja testataan pitkällä aikavälillä.

Toisessa skenaariossa (2), eli tasapuolisessa markkinaehtoisesta muutoksesta paljon sähköä kuluttavien johdolla, on kyse kysyntäjoustopotentialin maksimoimisesta, jossa aktiivisemmat toimijat kehittävät palveluitaan sekä hinnoittelun kautta ohjaavat eniten kuluttavia kuluttajia kysyntäjoustopotentialin liittyvien palveluiden hyödyntämiseen. Tässä lainsäädäntö kohdistuu pääosin vanhentuneiden tariffien purkamiseen (esimerkiksi aikaohjaus) ja sähkömittareiden päivittämiseen.

Viimeisessä skenaariossa (3), eli näkyvässä ja laajassa säädöksillä ohjatussa muutoksessa, kysyntäjoustopotentialin ratkaisu- ja toteuttamisvaihtoehdot määritetään lainsäädännön kautta ja vain näiden järjestelmien takana kysyntäjoustopotentiali toimii markkinaehtoisesti (esimerkiksi ohjaus vain sähkömittarin kautta). Tämä skenaario nähdään kaikkein nopeimpana tapana edistää kysyntäjoustopotentialin palveluita mutta siihen liittyy myös riskejä, jotka saattavat esiintyä kuluttajille haitallisina vaikutuksina. (Bremer ym. 2017.)

Huomionarvoinen asia on etäluettavan sähkömittarin, eli AMR-mittarin (Automatic meter reading), rooli kysyntäjoustopotentialin toteuttamisessa lähitulevaisuudessa. Tällä hetkellä mittari ei mahdollista kysyntäjoustopotentialin kokonaisvaltaista hyödyntämistä (Järventausta ym. 2015) ja Bremerin ym. (2017: 28) selvityksessä esitetäänkin näkökulma, jonka mukaan kysyntäjoustopotentialin toteuttaminen tapahtuu ensin ilman AMR-mittarin tapahtuvaa ohjausta. Toisaalta on myös mahdollista, että mittareiden käyttö tulee pakolliseksi, kun mittareita tulevaisuudessa päivitetään ja niiden ominaisuudet laajenevat (niin kutsuttu AMR 2.0).

2.4 Kysyntäjoustopotentiali pienkuluttajan näkökulmasta

Teollisuuden osallistumisaste kysyntäjoustopotentialin tarjontaan nähdään Euroopan näkökulmasta olevan hyväksyttävällä tasolla, joten fokus on nyt siirtymässä kotitalouksien ja pienkuluttajien puolelle (A. Azar ym. 2015: 14). Näin ollen pienkuluttajien näkemyksiä kysyntäjoustopotentialin ratkaisuja kohtaan on tärkeä ymmärtää, mikäli kyseinen kuluttajaryhmä on tällä hetkellä avainasemassa kysyntäjoustopotentialin edistämisessä.

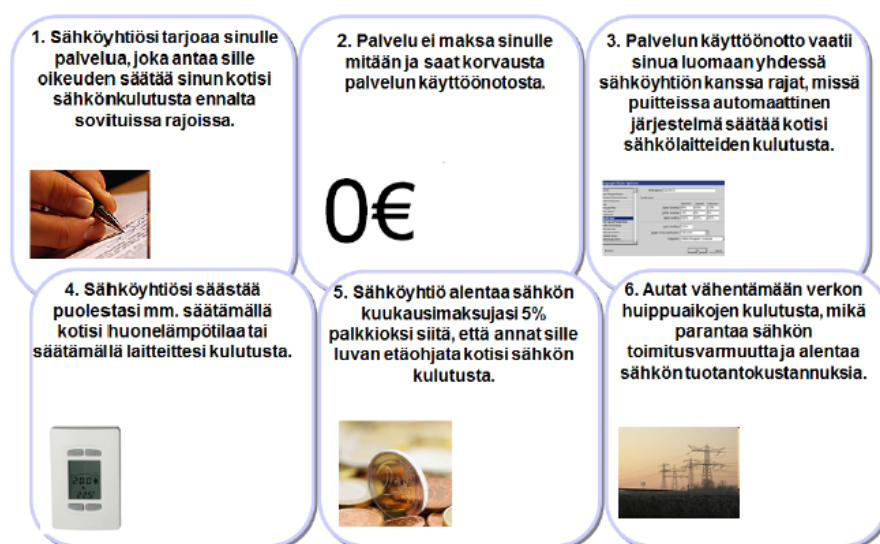
Pienkuluttajien houkuttelevuus mukaan kysyntäjoustopalveluihin esimerkiksi sähköso-
pimusten kautta on lähtökohtaisesti haastavaa, sillä alle 10 prosenttia sähkön pienkulut-
tajista vaihtavat vuodessa sähkösovimustaan, vaikka vuosien 2009–2010 tietojen mu-
kaan tarjotut sähkösovimukset olivat usein jopa 20 prosenttia edullisempia (Annala
2015). Tämä voi osittain johtua siitä, että osa kuluttajista ovat epäluuloisia sähkömarkki-
noita kohtaan ja uusiin sähkösovimuksiin ollaan yleisesti tyytymättömiä (Heiskanen ym.
2012: 39–40). Kysyntäjoustopalvelun kohdalla onkin arvioitu, että pienkuluttajien saaminen mu-
kaan kysyntäjoustopalveluun sähkösovimusten kautta, on vähintään yhtä hankalaa, kuin kulut-
tajien saaminen vaihtamaan sähkösovimustaan yleisesti (Annala 2015).

Kuluttajat osallistuvat kysyntäjoustopalveluihin yleensä kustannussäästöjen
takia. Kustannussäästöt eivät kuitenkaan ole ainut syy, vaan muita tekijöitä ovat muun
muassa ympäristöön liittyvät näkökulmat, halu osallistua sähköverkon luotettavuuden yl-
läpitoon sekä jossain tapauksissa mahdollisuus etäohjausjärjestelmien käyttöönottoon.
Huomattavaa on kuitenkin se, että odotetut kustannussäästöt ovat usein epäsuhteessa
arvioituihin todellisiin säästöihin, joten kysyntäjoustopalvelun edistämiseksi pienkuluttajan kes-
kuudessa tulee painottaa myös muita kuin rahallisia tekijöitä. (Annala 2015.)

Käynnissä olevan BCDC Energia -tutkimushankkeeseen liittyvän kyselytutkimuksen mu-
kaan 54 prosenttia kotitalouksista suhtautuvat myönteisesti sähkönkulutuksen etäoh-
jaukseen kysyntäjoustopalveluun (Ruokamo 2017). Myös Heiskanen ym. (2012:
39) mukaan suora kuormanohjaus nähdään kaikista kysyntäjoustopalvelun toteutus- ja hinnoit-
telumalleista mielekkäimpänä vaihtoehtona. BCDC Energia -tutkimushankkeen kysely-
tutkimuksen kohdalla on kuitenkin syytä huomata, että edellä mainituista 54 prosentista
vain kolmasosa on valmis osallistumaan niin kutsuttuun automaattiseen kysyntäjous-
toon, kolmasosa puoliautomaattiseen kysyntäjoustopalveluun ja jäljelle jäävä kolmannes manu-
aaliseen kysyntäjoustopalveluun (Ruokamo 2017). Automaattinen kysyntäjoustopalvelu edustaa alan
tämän hetkistä kehitystä ja sitä käsitellään tarkemmin luvussa 3. Annalan (2015: 58)
mukaan kuluttajat eivät kuitenkaan ole kiinnostuneita jatkuvasti seuraamaan energian
hintoja ja sen perusteella mukauttamaan sähkönkulutustaan, eli toisin sanoen osallistu-
maan jonkin tasoiseen manuaaliseen kysyntäjoustopalveluun. Annala (2015) arvioi myös, että
mikäli kuluttajalla on mahdollisuus vaikuttaa itse kysyntäjoustopalvelutapahtumaan esimerkiksi
jättäytymällä yksittäisestä kysyntäjoustopalvelutapahtumasta pois, kuluttajan myönteisyys ky-
syntäjoustopalvelua tarjoavia palveluita kohtaan todennäköisesti myös kasvaa.

Tutkimusten mukaan käyttäjät sallivat etäohjauksen yleensä silloin kun se ei vaikuta hei-
dän päivittäisiin rutiineihinsa eikä vaadi heiltä myöskään mitään toimenpiteitä (Annala

2015: 59; Kärkkäinen ym. 2008: 19). Tämä on kysyntäjoustopotentialin edistämiseksi eduksi, sillä se edustaa menetelmänä edellisessä kappaleessa mainittua automaattista kysyntäjoustopotentialia. Esimerkkejä tällaisista ohjauksista voisi nähdä olevan, vaikka ei kirjallisuudessa suoraan ilmaistu, taloteknisiin järjestelmiin liittyvät ohjaukset, joihin käyttäjä ei yleensä ole suoraan tekemisissä. Kotitalouslaitteiden kohdalla käyttäjät sallivat tavallisesti vain pesukoneisiin liittyvät etäohjaukset, kuten astianpesukoneen sekä pyykinpesukoneen ja kuivausrumpuun liittyvät ohjaukset (Annala 2015). Erään arvion mukaan nämä laitteet edustavat samalla kotitalouksien merkittävimpiä kulutuskohteita (A. Azar ym. 2015: 32), joten tämä onkin kysyntäjoustopotentialin näkökulmasta kuitenkin toivottava tilanne. Kuvassa 9 on esitetty miltä automaattinen kysyntäjoustopotentiali voisi näyttää kuluttajan näkökulmasta tarkasteltuna.



Kuva 9. Automaattisen [eksplisiittisen] kysyntäjoustopotentialin skenaario kotitalouden näkökulmasta (Heiskanen ym. 2012: 83).

Tarkastellessa kotitalouksien kulutustottumuksia yleisellä tasolla, on eräiden tutkimusten mukaan havaittu, että lisääntynyt tieto omasta energiankulutuksesta vaikuttaa esimerkiksi valaistuksen ja sähkölaitteiden sammuttamiseen, kun näille ei ole tarvetta. Kuitenkin muutokset käyttäytymisessä perustuvat yleensä omiin mielipiteisiin eivätkä esimerkiksi kohdistu merkittävimpiin kulutuskohteisiin. (Annala 2015.) Heiskanen ym. (2012) tekemän selvityksen mukaan pienkuluttajat ovat kuitenkin hyvin kiinnostuneita palveluista ja ratkaisuista, jotka tarjoavat kulutusseuranta- ja raportointipalveluita sekä myös laitteiden etäohjausta. Tämän perusteella kysyntäjoustopotentiali olisi luonteva toteuttaa osana sellaisia järjestelmäratkaisuja, jotka tarjoavat myös edellä mainittuja ominaisuuksia.

Taulukossa 2 on esitetty tämän työn aikana saatuja kyselytutkimuksen vastauksia, jossa asuinhuoneistot on varustettu HOUM-järjestelmällä johon kuuluu keskusyksikkö, älykäs valaistus ja elektroninen patteritermostaatti ja joiden ohjaus tapahtuvat mobiiliapplikaation kautta. Laaditut kysymykset ovat monivalintakysymyksiä ja ne on esitetty kokonaisuudessaan tämän työn liitteessä 3. Kyselytutkimuksen tulokset eivät tämän työn aikana olleet vielä hyödynnettävissä mutta ne esitetään kuitenkin tässä, jolloin ne ovat mahdollisia tulevia tutkimuksia varten vapaasti hyödynnettävissä.

Taulukko 2. Kyselytutkimuksesta saadut vastaukset opinnäytetyön aikana.

Kysymys	Vastaukset, vastaaja 1	Vastaukset, vastaaja 2
Vastaajan sukupuoli	Mies	Mies
Vastaajan ikä	50-64 vuotta	65-79 vuotta
Paikkakunta	Hämeenlinna	Helsinki
Ammatti tai asema	Toimihenkilö/asiantuntija	Eläkeläinen
Mihin näistä ryhmistä taloutenne kuuluu?	Sinkkotalous	Aikuistalous (vain yli 18-vuotiaita)
Minkä perusteella voisit sallia asuntosi sähkö- ja lämmityslaitteiden etäohjauksen energiajärjestelmien optimoimiseksi: (voit valita useita)	Sinulla olisi mahdollisuus hallita asuntosi sähkö- ja lämmityslaitteita myös itse (esimerkiksi asettaa aikatauluja, hallita laitteita etänä)	Sinulla olisi mahdollisuus hallita asuntosi sähkö- ja lämmityslaitteita myös itse (esimerkiksi asettaa aikatauluja, hallita laitteita etänä)
Mikäli asuntosi olisi varustettu energianhallintajärjestelmällä, jonka kautta asunnon sähkö- ja lämmityslaitteita voisi ohjata, käyttäisitkö sitä mieluiten:	Älypuhelimien kautta	Älypuhelimien kautta
Olisitko valmis laskemaan asuntosi sisälämpötilaa talvella hetkellisesti (esimerkiksi 1 °C:lla) energiajärjestelmän optimoimiseksi?	Ei	Kyllä
Olisitko valmis vähentämään valaistuksen tehoa hetkellisesti korkean sähkönhinnan aikaan?	Ei	Kyllä
Olisitko valmis siirtämään saunomista esim. tuntia myöhemmäksi sähkön ollessa kallista?	Ei	Kyllä
Olisitko valmis käyttämään pyykinpesukoneen ja astianpesukoneen ajastusta siirtääksesi koneiden käytön edullisempaan sähkönhinnan aikaan?	Ei	Kyllä
Mikä sai osallistumaan tähän tutkimukseen?	Mahdollisuus kokeilla uusinta tekniikkaa	Mahdollisuus kokeilla uusinta tekniikkaa
Mitä mieltä olet uudesta valaistuksenohjausjärjestelmästä?	Hyvä ja näppärä, helpottaa arkea	Ihan ok, mutta pärjäisin ilmeisesti
Miten olet kokenut sovelluksen käytön?	Helppo käyttää ja selkeä sovellus	Sovellus voisi olla selkeämpi, mutta olen oppinut käyttämään
Miten olet kokenut huoneiden lämpötilat uuden sääntömahdollisuuden jälkeen?	Jokin muu	En ole huomannut muutosta

3 Kysyntäjoustop toteuttaminen rakennuksissa

Tässä osiossa tutkitaan kysyntäjoustop toteuttamiseen liittyviä käsitteitä ja toimenpiteitä, joiden avulla luodaan käsitys kysyntäjoustop toteuttamisen edellytyksistä ja mahdolli-

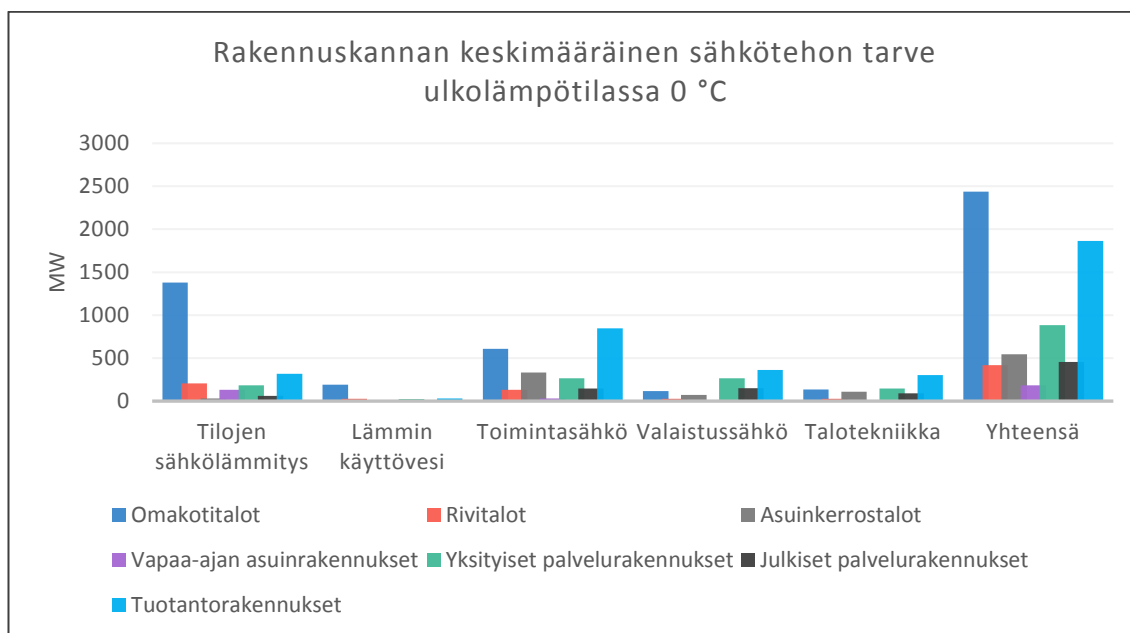
sessä kysyntäjoustoprojektissa selvitettävistä tai määritettävistä yksityiskohdista. Edellisen osion ja tämän osion kirjallisuustutkimuksen ja syntetisoinnin avulla luodaan runko kehitettävälle toimintamallille, jota lisäksi täydennetään empiiristen osion tutkimustuloksilla soveltuvin osin.

3.1 Kysyntäjoustoprojektin ohjattavissa oleva tehopotentiali

Energiatehokkuudesta ja siihen liittyvästä toiminnasta julkisesti keskustellessa huomio keskittyy usein rakennusten energiankulutukseen (kWh) mutta rakennusten kysyntäjoustopotentialia arvioidessa huomio keskittyy energiaa käyttävien järjestelmien ja laitteiden tehontarpeeseen (kW) ja niiden ohjausmahdollisuuksiin, minkä myötä energiatehokkuuden optimointi laajenee rakennustasosta koko energian toimitusketjuun.

Sähkön kysyntäjoustopotentiali (tai kysyntäjoustopotentiali) muodostuu luonnollisesti rakennuksen ohjattavissa olevista sähkölaitteista mutta sen laskeminen ei ole yhtä suoraviivaista. Tehopotentialia ei ole esimerkiksi mahdollista määrittää laskemalla rakennuksen sähkölaitteiden nimellistehoja yhteen, sillä laitteet käyvät usein osateholla ja niiden käyttöaste ja käyttöajat eroavat toisistaan. Näin ollen sähkön kysyntäjoustopotentialia arvioidessa tulee miettiä ja selvittää laitteiden todellista tehontarvetta ja käytön samanaikaisuutta sekä niiden käyttöaikaa suhteessa kysyntäjoustopotentialin ajankohtaan. (Järventausta ym. 2015: 104.) Tämä arviointi voidaan esimerkiksi tehdä taulukkolaskentaohjelmalla ST-kortin 13.31 huipputehon laskentakaavoja hyödyntämällä (esim. Järventausta ym. 2015: 105–22) tai olemassa olevan rakennuksen kohdalla kenttäkokeita suorittamalla (Automated Demand Response Using OpenADR 2011: 36–7) – lisäksi sähkön tehopotentialin arvioimiseen on myös kehitetty erilaisia arviointityökaluja kuten Yhdysvaltalaisen Lawrence Berkeley National Laboratoryn DRQAT ja DLAT -työkalut (Demand response research center - Tools 2018) sekä VTT:n kehittämä simulointi- ja optimointityökalu DyRES (Huovinen 2017). Suomen rakennuskannan osalta suurin ohjattava tehopotentiali näyttäisi muodostuvan sähkölämmitteisistä asuinrakennuksista (Järventausta ym. 2015) – tarkemmin pientaloista ja rivitaloista, sillä näiden osuus sähkölämmitteisten rakennusten kokonaislukumäärästä oli vuoden 2016 tilastojen mukaan 89 % (Rakennukset käyttötarkoituksen ja lämmitysaineen mukaan 2016). Palvelurakennukset muodostavat myös merkittävän tehopotentialin ja teollisuusrakennuksissa kysyntäjoustopotentiali on jo osittain käytössä (Järventausta ym. 2015). Asuinkerrostalot muodostavat sähkötehon osalta muita rakennuksia vaatimattomamman tehopotentialin ja li-

säksi niissä potentiaali on myös kovin hajautettua (Järventausta ym. 2015: 122). Kuvassa 10 on esitetty Suomen rakennuskannan keskimääräinen sähköntarve ulkolämpötilassa 0 °C, johon arviot perustuvat.



Kuva 10. Rakennuskannan keskimääräinen sähkötehon tarve ulkolämpötilalla 0 °C (mukautettu Järventausta ym. 2015: 27).

Kaukolämmön kysyntäjouaston tehopotentiaali muodostuu yksinkertaistetusti ilmaistuna rakennuksen lämpöhäviöstä ja lämmönvarausominaisuuksista vallitsevassa säätilassa yhdistettynä sisäisillä lämpökuormilla sekä lämmitysjärjestelmän tyypistä ja hyötysuhteesta, jonka perusteella rakennuksen hetkellinen lämmitysteho määräytyy. Lisäksi kokonaislämmitystehtoon vaikuttaa lämpimän käyttöveden kulutus ja sen käyttöprofiili. (Vihola ym. 2015: 603.) Rakennuksen lämmönvarausominaisuuksien ja sitä kautta termisen joustavuuden arvioimiseen on olemassa useita menetelmiä, joista kevyimmät perustuvat rakennuksen yksinkertaistettuihin laskentamalleihin, jotka voidaan suorittaa taulukkolaskentaohjelmalla (esim. Kärkkäinen ym. 2003: 18–20; Big ym. 2016). Rakennuksen termiseen käyttäytymiseen liittyy kuitenkin niin monta muuttujaa, että monet kysyntäjoustoön liittyvät tutkimukset hyödyntävät rakennussimulointiohjelmia kysyntäjouaston tutkimiseen (esim. Foteinaki ym. 2016; Sarran ym. 2017), sillä ohjelmien avulla rakennuksen termiseen joustavuuteen vaikuttavat tekijät voidaan ottaa huomioon hyvin monipuolisesti. Lämmityksen kysyntäjoustoön liittyviin tekijöihin sekä laskenta- ja mallinnusmenetelmiin perehdytään tarkemmin tämän työn luvussa 4.

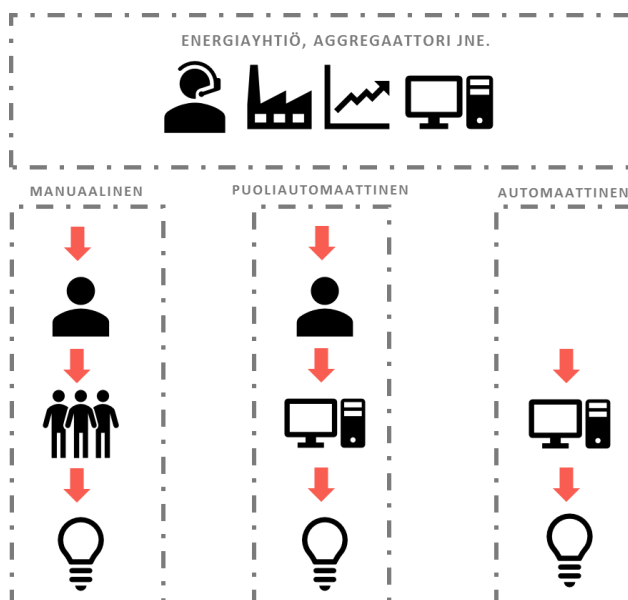
3.2 Kysyntäjouaston toteuttamisen edellytykset

Kysyntäjouaston toteuttamista tarkasteltiin niin kutsutun automaattisen kysyntäjouaston (eng. automated demand response tai ADR) näkökulmasta mutta käytännössä kysyntäjouaston täytäntöönpano voidaan luokitella myös puoliautomaattiseksi tai manuaaliseksi.

Manuaalinen kysyntäjousto voidaan nähdä perinteisenä tapana toteuttaa kysyntäjousto, jossa ihminen energian tuotannon tarpeesta sammuttaa tai vähentää laitteiden käyttöä tai muuttaa jonkin järjestelmän asetusarvoja. (Motegi ym. 2007: 6; Automated Demand Response Using OpenADR 2011: 19.) Manuaalisessa kysyntäjoustopuhtaus puhutaan kuitenkin edelleen eksplisiittisestä kysyntäjoustopuhtaus, ellei käyttäjä omasta aloitteesta seuraa energian hintoja ja mukauttaa kulutustaan hinnan perusteella, ilman energiantuotannon erillistä pyyntöä.

Puoliautomaattinen kysyntäjousto sijoittuu menetelmänä manuaalisen ja automaattisen kysyntäjoustopuhtaus välille. Tässä menetelmässä varsinainen kuormanohjaus toteutetaan ohjausteknisesti katsottuna automaattisesti mutta kysyntäjoustopuhtaus tapahtuma käynnistetään ihmisen toimesta. (Motegi ym. 2007: 6; Automated Demand Response Using OpenADR 2011: 19.) Täten se voidaan nähdä olevan manuaalista kysyntäjoustopuhtaus hieman nopeampi tai monipuolisempi menetelmä.

Edellä mainituista menetelmistä varsinkin manuaalinen kysyntäjousto ei enää vaikuta vastaavan tämän päivän tarpeita, eteenkin sähköjärjestelmän osalta jossa uusiutuvien energiamuotojen lisääntyminen vaatii nopeita muutoksia tehotasapainon ylläpitämiseksi, joten nykyisissä kysyntäjoustopuhtausratkaisuissa onkin yleensä tai kasvavissa määrin kyse automaattisesta kysyntäjoustopuhtaus (Airaksinen ym. 2017; Automated Demand Response Today 2012; A. Azar ym. 2015: 14). Rakennus- tai kiinteistötasolla automaattinen kysyntäjousto suoritetaan nimensä mukaisesti täysin automaattisesti ulkoisen hintasignaalin avulla, ilman ihmisen vuorovaikutusta. Mistään koneiden vallankumouksesta ei kuitenkaan ole kyse vaan ihminen pystyy halutessaan peruttamaan tai keskeyttämään kysyntäjoustopuhtaus tapahtuman – ja se onkin yksi edellytys kysyntäjoustopuhtausstrategioita suunnitellessa. (Motegi ym. 2007: 6; Automated Demand Response Using OpenADR 2011: 19; Automated Demand Response in New Construction: Technical Design Guidelines 2014: 33.) Edellä kuvattujen menetelmien erot on havainnollistettu kuvassa 11.



Kuva 11. Manuaalinen, puoliautomaattinen ja automaattinen kysyntäjousto havainnollistettuna (mukautettu Weigand & Curran N.d.).

Joitain keskeisiä edellytyksiä kysyntäjouston toteuttamiselle, varsinkin automaattisen, ovat sekä asuinkerrostaloissa että muissa rakennustyypeissä monipuoliset ohjaus- ja säätömahdollisuudet ja tietenkin ohjattavissa olevat laitteet ja järjestelmät (Airaksinen ym. 2017; Automated Demand Response Using OpenADR 2011: 40–1). Edellä mainittuihin seikkoihin (kuten muihin rakennuksen elinkaareen vaikuttaviin asioihin) vaikutetaan merkittävimmin rakennuksen varhaisessa suunnitteluvaiheessa (Järventausta ym. 2015: 163–4). Kysyntäjousto on täten kustannustehokkaimmillaan uudisrakentamisessa tai peruskorjauksissa, varsinkin silloin kun rakennus varustetaan rakennusautomaatiojärjestelmällä kysyntäjoudesta riippumatta. Tällöin kysyntäjouston vaatimukset voidaan ottaa huomioon pienin toimenpitein. (Harsia ym. 2017: 4–5; Airaksinen ym. 2017: 5.)

Kysyntäjouston käyttöön ottaminen vaikeutuu olemassa olevien rakennusten kohdalla, eteenkin mikäli rakennuksesta ei löydy monipuolista rakennusautomaatiojärjestelmää (Järventausta ym. 2015). Tällöin kysyntäjouston käyttöön ottaminen ei välttämättä ole kannattavaa, sillä menetelmän hyödyntäminen voi vaatia laajoja muutoksia rakennuksen johdotuksissa ja ohjauslaitteissa, joita voi olla haastava perustella, koska yksittäisen kotitalouden kysyntäjoudesta syntyvät tuotot on arvioitu olevan suhteellisen pieniä (Järventausta ym. 2015: 137; Annala 2015). Rakennuksissa on kuitenkin yleistymässä johdotuksia korvaavat langattomaan tiedonsiirtoon perustuvat ratkaisut, joiden uskotaan tuovan uusia mahdollisuuksia muun muassa kysyntäjouston ja niin kutsuttujen älyrakennusten edistämässä (RIL 267-2015 Käyttäjälähtöinen älyrakennus 2015: 112).

Kuten on aikaisemmin mainittu, automaattinen kysyntäjoustotapahtuma käynnistetään rakennuksessa ulkoisen hintasignaalin avulla ja tämä vaatii toimiakseen siihen soveltuvan rajapinnan. On mahdollista, että lainsäädäntö ottaa tähän tulevaisuudessa kantaa (Bremer ym. 2017: 21) mutta toistaiseksi tämän toteuttamiseksi on olemassa useita hyväksyttäviä vaihtoehtoja. Sähkön kysyntäjoustopuolella signaalin voi tuoda kiinteistöön joko etäluettavalle sähkömittarille eli AMR-mittarille, jonka takana ohjattava kuorma on, tai välillisesti sähkömittarin kautta erilliseen järjestelmään. Sähkömittarista kokonaan erilliset järjestelmät ovat myös mahdollisia. Tällöin signaali tuodaan rakennukseen esimerkiksi internet-yhteyden välityksellä, johon on olemassa useita protokollia tiedonsiirto-rajapinnalle. (Järventausta ym. 2015: 101–2.) Joitain tällaisia esimerkkejä ovat Helsingin Kalasatamassa käytetty IEC CIM -protokolla (Järventausta ym. 2015: 226–32) ja Yhdysvalloissa yleistynyt OpenADR-protokolla (OpenADR 2.0 Demand Response Program Implementation Guide 2014). AMR-mittarin avulla voidaan ohjata vain siihen suoraan kytkettyjä sähkökuormia (Järventausta ym. 2015: 101–2), joten laajamittaisen kysyntäjoustopuolella toteuttamiseksi signaali voisi nähdä olevan järkevä tuoda joko välillisesti AMR-mittarin kautta tai suoraan muun tiedonsiirto-rajapinnan kautta rakennuksen automaatiojärjestelmälle toteutettavaksi.

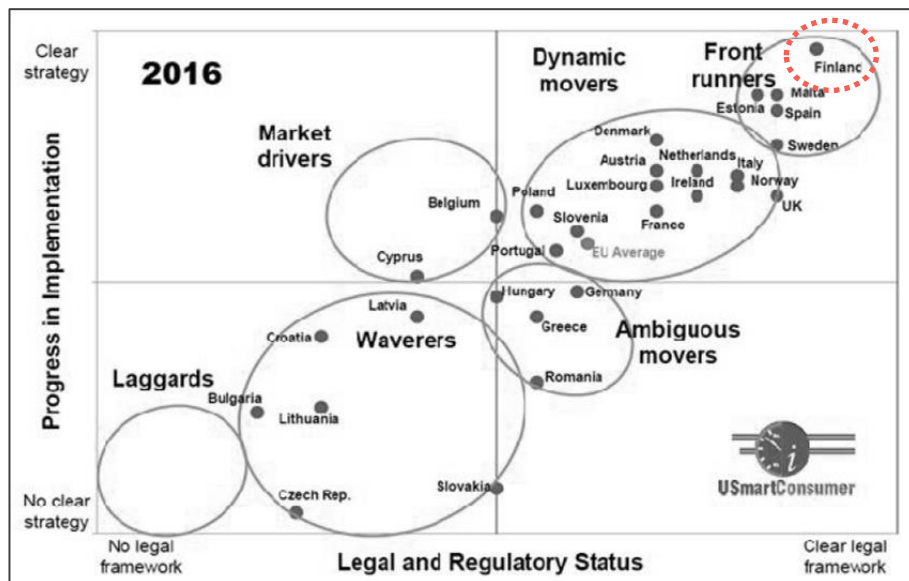
Kaukolämmön kysyntäjoustopuolella ohjaussignaali voidaan yksinkertaisimmillaan välittää kaukolämpöyhtiön etäluettavasta mittauskeskuksesta kulutuskohteen lämmönjakokeskukselle (Pesola ym. 2011: 29–31). Tämän kytkennän tekeminen on suhteellisen yksinkertaista, sillä rakennuksen lämmönjakokeskus ja energiayhtiön mittauskeskus sijoitetaan useimmiten yhteiseen tilaan (Julkaisu K1/2013, rakennusten kaukolämmitys, määräykset ja ohjeet 2014: 59–63). Vastaavalla ajatuksella ohjaussignaalin voisi myös välittää rakennuksen automaatiojärjestelmälle, esimerkiksi järjestelmään liitettyjen vyöhykekohtaisten lämmityslaitteiden ohjaamiseksi. Nykyaikaisten kaksisuuntaisella tiedonsiirtomahdollisuudella varustettujen mittauskeskusten myötä kaukolämpöyhtiö tai aggregaattori voi ainakin teoriassa saada tietoa kuormanpudotuspyynnön vastaanottamisesta, -pudotuksen onnistumisesta ja -pudotuksen suuruudesta (Pesola ym. 2011: 29–31). Vanhemmissa kaukolämpökiinteistöissä etäyhteyden mahdollisuuksia ei välttämättä ole, joten nämä vaativat arvioiden mukaan joko järjestelmän päivittämistä tai yksinkertaisempaa lähestymistapaa, kuten ennakkoon määritetyt aikaohjelmat (Kaukolämmön kysyntäjoustopuolella 2015: 29). Tämä voidaan kuitenkin nähdä olevan hieman vanhentunut ajatus, sillä esimerkiksi sähkön kysyntäjoustopuolella kehityksessä pyritään siirtymään pois perinteisistä ohjauksista, kuten edellä mainitusta aikaohjauksesta, suosien dynaamisempia ratkaisuja (Pahkala ym. 2017: 8). Kiinteistön kehityksen ja helppokäyttöisyyden kannalta

integroidun rakennusautomaatiojärjestelmän käyttö, jossa rakennuksen kaikki talotekniset järjestelmät ja muut mahdolliset järjestelmät ja laitteet ovat keskitetysti hallittavissa, voisi nähdä olevan perusteltua, mikäli kiinteistössä pyritään toteuttamaan sekä sähkön että kaukolämmön kysyntäjoustoa. Näin kysyntäjoustotapahtumat ovat helpommin hallittavissa ja niiden (sähkö ja kaukolämpö) keskinäinen optimointi myös mahdollista.

Edellä mainittujen seikkojen lisäksi varsinaisen jouston luotettava todentaminen on ehdoton edellytys kysyntäjouston toteuttamiselle, sillä ilman todentamista kysyntäjoustolla on hankala tai mahdotonta käydä kauppaa eikä kysyntäjoustoa voida tehokkaasti hyödyntää sen suunniteltuun käyttötarkoitukseensa (OpenADR 2.0 Demand Response Program Implementation Guide 2014; Demand response for small to midsize business customers 2010; Järventausta ym. 2015; Automated Demand Response Using OpenADR 2011; Auvinen ym. 2018). Käytännössä tämä tarkoittaa energiankulutuksen mittaamista tai tarkemmin, varsinkin sähköjärjestelmän osalta, lähes reaaliaikaista tai reaaliaikaista mittaamista. Mittaustieto tulee lisäksi olla luotettavasti välitettävissä kaikille tarvittaville osapuolille (energiayhtiö, aggregaattori jne.). (Auvinen ym. 2018.) Esimerkiksi sähkön reservimarkkinoilla kuormanpudotuksen vasteajan (kuormanpudotuspyynnöstä kuormanpudotukseen) vaatimus voi olla sekunteja ja muissa enintään 15 minuuttia, lukuun ottamatta Spot-markkinoita, jossa taseselvitys on tällä hetkellä 60 minuuttia, vaikka sekin todennäköisesti on muuttumassa 15 minuuttiin taseselvitykseen lähitulevaisuudessa (Sähkömarkkinat 2018). Kaukolämpöverkko reagoi muutoksiin sähköverkkoa huomattavasti joustavammin, joten siinä tuntiperusteinen (60 min) mittaus nähdään riittävänä (Pesola ym. 2011: 31–2).

Suomi on edelläkävijä niin kutsuttujen sähkön älymittareiden asennuksissa (kuva 12), joiden käyttöönottoa Euroopan unioni on jäsenvaltioiltaan tietyin ehdoin velvoittanut siten sähkömarkkinadirektiivin 72/2009. Suomessa näitä mittareita oli pienjännitekohteissa vuoden 2016 mennessä asennettu 99,6 prosentin kattavuudella ja tällä hetkellä keskustelua käydään jo seuraavan sukupolven älymittareiden ominaisuuksista, niin kutsuttujen AMR 2.0 -mittareiden ominaisuuksista. (Älyverkkotyöryhmä: Seuraavan sukupolven älykkäiden sähkömittareiden vähimmäistoiminnallisuudet 2017.) Tällä hetkellä asennettujen älymittareiden ominaisuudet rajoittavat osittain kysyntäjouston hyödyntämistä kaikilla markkinapaikoilla ja lisäksi mittareita ei voida suoraan hyödyntää kysyntäjouston ohjaukseen – mittareiden ominaisuuksien rajallisesta hyödyntämisasteesta ja kirjavista asennustavoista johtuen. Lisäksi mittarit eivät mahdollista riittävän reaaliaikaista mittaamista ja mittaustiedon edelleen välittämisessä tarvittaville osapuolille liittyä

haasteita. (Järventausta ym. 2015.) Tästä syystä nykyisten älymittareiden hyödyntämisen mahdollisuudet ovat hyvin riippuvaisia rakennuskohteesta.

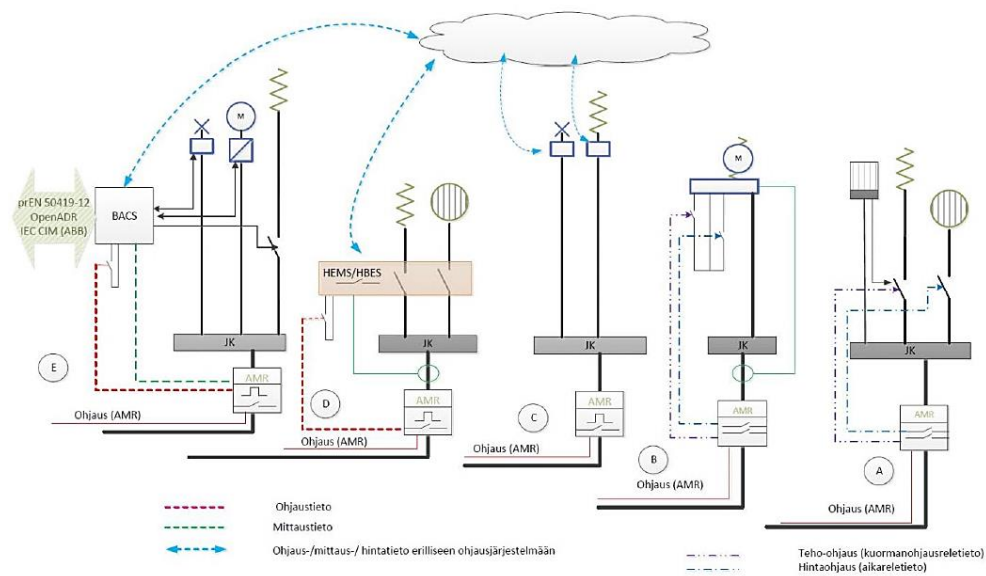


Kuva 12. EU-jäsenmaiden lainsäädännön ja älymittarien käyttöönoton suhde (Älyverkkotyöryhmä: Seuraavan sukupolven älykkäiden sähkömittareiden vähimmäistoiminnallisuudet 2017: 26). Kuvaajasta nähdään, että Suomi on aivan kärkipäässä.

Kaukolämmön kysyntäjousto nähdään olevan sähkön kysyntäjousto vaikeammin hallittavissa, joten kaukolämmön kysyntäjoustopahtumassa korostuu myös muiden kuin lämmityksen energia- ja tehomittausten hyödyntäminen kysyntäjoustopahtumassa toteuttamisessa. Tämä johtuu siitä, että lämmitysjärjestelmät reagoivat sähkökuormiin verrattuna hitaasti muutoksiin, tehden tapahtuman ennakoimisesta haastavan, sillä monet ulkoiset tekijät ehtivät vaikuttaa lämmitystehotarpeeseen kysyntäjoustopahtuman aikana, jolloin ennustettu jousto ei välttämättä toteudu. Jotain tällaisia tekijöitä ovat ihmisten käyttäytyminen rakennuksen sisällä ja mahdolliset muut lämmityslähteet sekä tietenkin kysyntäjoustopahtuman aikana vallitseva säätila. Näiden muuttujien luotettava hallinta ja tarvittaessa mittaaminen on kaukolämmön kysyntäjoustopahtumassa kannattavuuden kannalta erittäin tärkeää. Tällöin puhutaan myös ennuste-epävarmuuden hallinnasta. (Kaukolämmön kysyntäjousto 2015: 20.) Kaukolämmön mittaamisesta muodostuu lisäksi haaste, mikäli kysyntäjoustopahtumasta saatavia hyötyjä halutaan mittaamalla kohdistaa asuntokohtaisesti, sillä asuntokohtainen lämmityksen mittaaminen on sähkön ja vedenkulutuksen mittaamista selkeästi haastavampaa (Vainio ym. 2017). Lämmityksen asuntokohtaista mittaamista tarkastellaan yksityiskohtaisemmin luvussa 3.5.

3.3 Kysyntäjoustop järjestelmäratkaisut

Kuten on todettu, kysyntäjoustop tehokas hyödyntäminen vaatii monipuolisia ohjaus- ja säätöjärjestelmiä, joille on olemassa useita eri vaihtoehtoja. Esimerkiksi Järventausta ym. (2015) toteuttamassa laajassa kysyntäjoustop tutkimushankkeessa esitetään neljä erilaista tapaa toteuttaa sähkönp kysyntäjoustop järjestelmänäkökulmasta – nämä on esitetty kuvassa 13. Ratkaisut perustuvat käytännössä siihen, tapahtuuko ohjaus etäluettavan sähkömittarin välityksellä vaiko erillisen järjestelmän kautta (esim. internet).

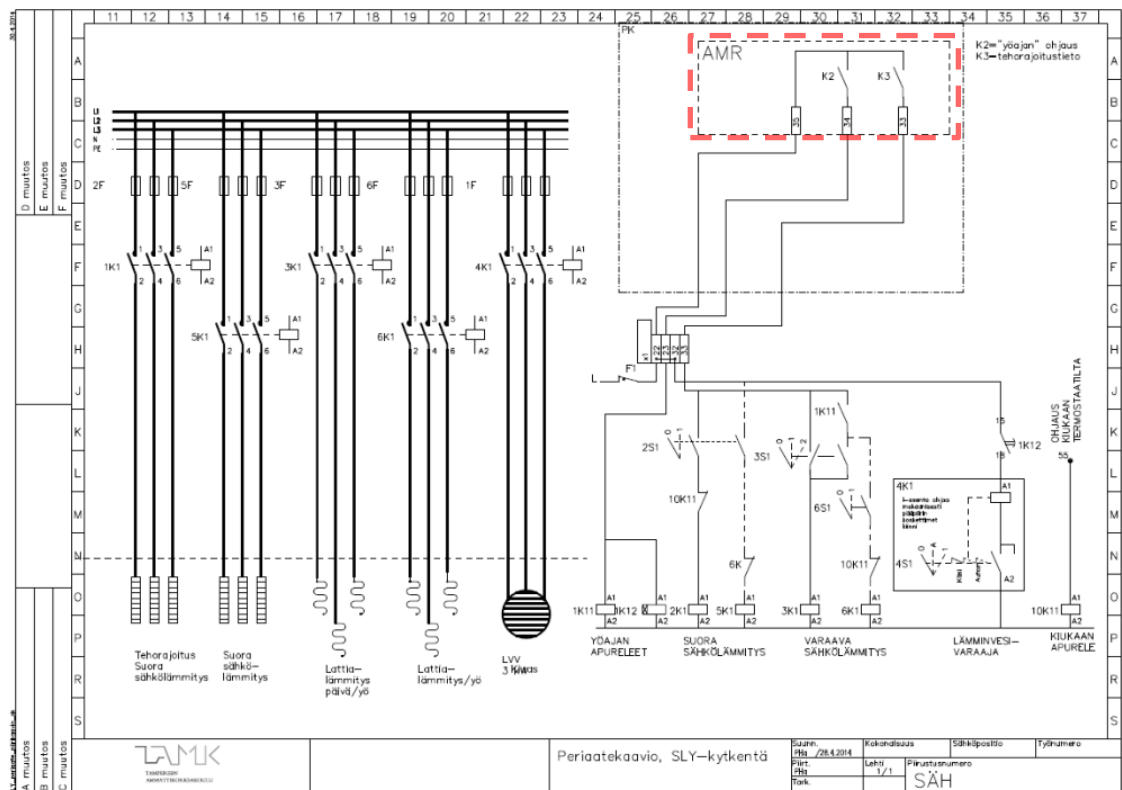


Kuva 13. Ohjaustiedon välityksiperiaatteet kiinteistön sähköverkkoon (Järventausta ym. 2015: 102).

Vaihtoehdossa A) sähkökuormia ohjataan suoraan aika- tai tehonrajoitustiedon perusteella etäluettavan sähkömittarin kautta. Vaihtoehdossa B) ohjaustieto välitetään etäluettavan sähkömittarin kärkitiedon kautta omalla ohjausjärjestelmällä varustetulle yksittäiselle laitteelle. Vaihtoehdossa C) nykyaikaiset älylaitteet (IoT) vastaanottavat ohjaustiedon erillisen järjestelmän kautta ja vaihtoehdoissa D) ja E) ohjaustieto tuodaan joko etäluettavan sähkömittarin kärkitiedon tai erillisen järjestelmän kautta energianhallintaan tarkoitettuun ohjausjärjestelmään tai monipuoliseen rakennusautomaatiojärjestelmään. (Järventausta ym. 2015.)

Vaihtoehto A edustaa tänäkin päivänä käytössä olevaa sähköyhtiöiden hyödyntämää Sähkölaitosyhdistyksen kytkentäsuositusta (SLY/92), jolla on mahdollistettu sähkölämmitystalojen aikaohjauksia (esim. yösähkö) ja suoria kuormanohjauksia esimerkiksi AMR-mittarin aika- ja tehon-ohjausreileitä hyödyntämällä. Varsinkin sähkölämmitteisissä

pientaloissa kytkentä olisi hyödynnettävissä kysyntäjoustopuon kuormanohjauksessa pienin toimenpitein. (Järventausta ym. 2015: 122–33.) Tuoreessa työ- ja elinkeinoministeriön älyverkkotyöryhmän väliraportissa aikaohjaus nähdään vanhentuneena kuormanohjausmenetelmänä ja suoraan jakeluverkkoyhtiöiden hyödyntämänä kyseenalaisena toimintana yhtiöiden monopoliasemasta johtuen. Kysyntäjoustopuon on työryhmän mukaan kilpailtua liiketoimintaa, eikä täten sovellu suoraan jakeluverkkoyhtiöiden hallittavaksi muina kuin poikkeustapauksissa (esimerkiksi häiriötapauksessa). Jakeluverkkoyhtiöt, kuten kaikki muutkin sähköverkon toimijat, hankkisivat tulevaisuudessa tarvittavan joustokapasiteetin markkinoilta. Raportissaan työryhmä esittääkin aikaohjauksesta luopumista suosien dynaamisempia ohjausjärjestelmiä, jotka kykenevät reagoimaan tulevaisuuden yhä vaihtelevaan sähköntuotantoon. Aikaohjauksesta luovuttaisiin muiden kysyntäjoustopuonratkaisujen kehittyessä kuluttajan kannalta taloudellisesti järkevälle tasolle. Työryhmän mukaan sähköverkon tehotasapainon ja luotettavuuden kannalta markkinahintaan monipuolisesti reagoiva kysyntäjoustopuon on pitkällä aikavälillä yhteiskunnallisesti ekologisempi ja kustannustehokkaampi vaihtoehto. (Pahkala ym. 2017) Kuvassa 14 on esitetty SLY-kytkennän periaate, jossa nähdään myös AMR-mittarin apureleet K1 (tehonrajoitusrele) ja K2 (aikaohjausrele).



Kuva 14. Esimerkki vaihtoehdosta A: Huonekohtaisen lämmityksen SLY-kytkentä, jossa esitetty AMR-mittarin apureleet (Järventausta ym. 2015: 124).

Vaihtoehto B voisi nähdä edustavan mitä tahansa yksittäistä laitetta, jota on mahdollista ohjata ulkoisen karkitiedon avulla (AMR-mittarin apureleet K1/K2). Täten kyse voisi esimerkiksi olla omalla ohjaus- ja säätöjärjestelmällä varustetusta ilmanvaihtokoneesta, lämpöpumpusta tai kaukolämmön alakeskuksesta.

Vaihtoehto C edustaa nykyaikaisia internetiin kytkettyjä laitteita, jotka pystyvät toimimaan itsenäisesti ilman erillistä ohjausjärjestelmää. Eräitä tällaisia laitteita voi katsoa olevan Siemensin ja Boschin Home Connect -palvelua tukevat kodinkoneet (Home Connect – yhdistä kotisi. N.d.), joita on myös mahdollista yhdistää suuremmaksi kokonaisuudeksi sekä erilaiset langattomat ohjaus- ja säätölaitteet, kuten rakennuksen ryhmäkeskuksiin asennettavat langattomat relemoduulit (kuva 15) ja radiaattoreihin asennettavat elektroniset toimilaitteet (kuva 16).



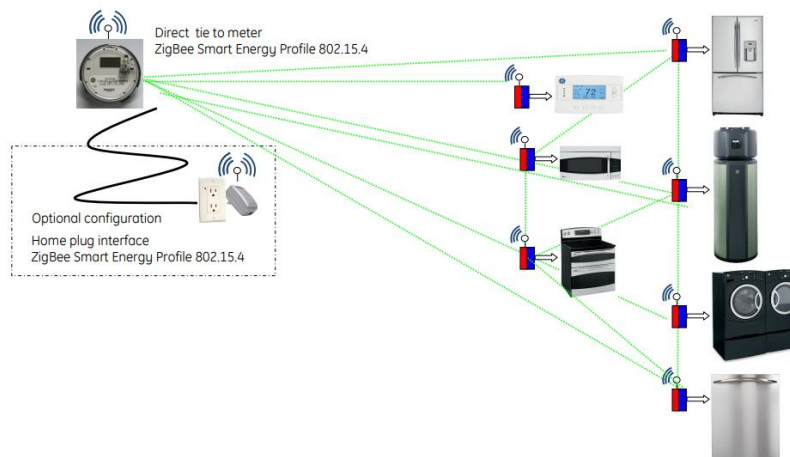
Kuva 15. Ryhmäkeskukseen asennettava langaton relemoduuli (Aarup ym. 2014: Appendix 4: 25).



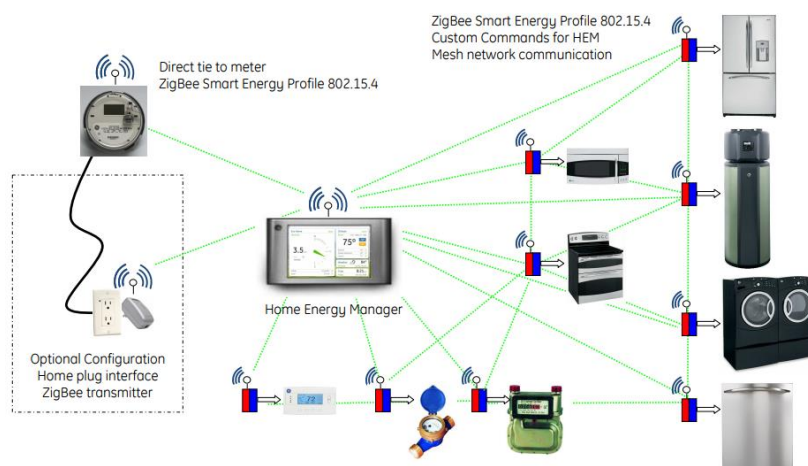
Kuva 16. Langaton patteritermostaatti (Lisää mukavuutta ja säästöjä lämmitykseen 2018).

Tällaisia täysin kysyntäjoustoon visioituja järjestelmäratkaisuja on esitetty ainakin General Electricin toimesta, joka vuonna 2009 esitteli konseptin, jossa laitteet ovat joko radioyhteyden avulla yhteydessä suoraan jakeluverkkoyhtiöön, langattoman ZigBee-tietoliikenneverkon avulla etäluettavaan sähkömittariin (kuva 17) tai välillisesti kodin energiahallintajärjestelmän kanssa (kuva 18) (Najewicz 2009), joka periaatteessa edustaa jo vaihtoehtoa D. Edellä mainitut laitteet ja ratkaisut herättävät vääjäämättä kysymyksiä

yksityisyyden suojasta ja kyberturvallisuudesta ja sen huomioimisesta järjestelmäratkaisua suunnitellessa, mikä liittyykin kysyntäjoustoa paljon laajempaan käsitteeseen, nimitäin esineiden internetiin (eng. Internet of Things tai IoT). Esineiden internetissä on kyse internet-verkon laajentumisesta siten, että tavanomaiset esineet voivat keskustella ja jakaa informaatiota toistensa kanssa internet-verkon yli. Tällöin verkkohyökkäyksistä ei voida arvioiden mukaan täysin välttyä, vaikka se onkin edelleen suhteellisen harvinaista, ja teknologian hyödyntäminen vaatiikin panostusta kyber- ja tietoturvallisuuteen sen jokaisella osa-alueella. (Digitalization and Energy 2017: 19, 24.) Teknologian selkeitä hyötyjä rakentamisen näkökulmasta ovat kuitenkin mahdollisuudet rakennusten toiminnallisuuksien lisäämiseen ilman tarvetta kaapeloinnille langattoman tiedonsiirron myötä (RIL 267-2015 Käyttäjälähtöinen älyrakennus 2015: 85). Asuinkerrostalojen kohdalla on kuitenkin energianhallintaratkaisujen käytännön kokeiluissa havaittu haasteita langattoman tiedonsiirron kantavuudessa, sillä kerrostaloissa sähkömittarit sijaitsevat yleensä kellarissa (Heiskanen ym. 2012: 20).

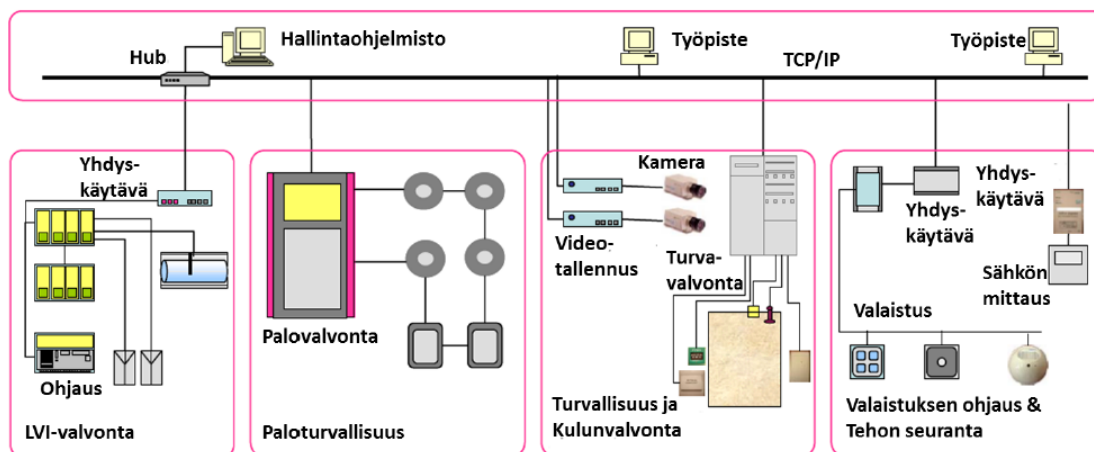


Kuva 17. Esimerkki vaihtoehdosta C: General Electric H2H -konsepti, jossa älykkäät kodinkoneet ovat yhteydessä etäluettavaan sähkömittariin (Najewicz 2009).



Kuva 18. Esimerkki vaihtoehdosta C/D: General Electric H2H -konsepti, jossa älykkäät kodinkoneet ovat yhteydessä kodin energianhallintajärjestelmään (Najewicz 2009).

Vaihtoehdoissa D ja E esitetään Järventaustan ym. (2015) tutkimushankkeessa periaatteessa kaksi saman tyyppistä mutta vain eri tasoista rakennusautomaatiojärjestelmää, joista Euroopan komission standardisarjan EN 50491 mukaan ensimmäinen vaihtoehto HBES (Home and Building Electronic Systems) on suunnattu asuinrakennuksille ja jälkimmäinen vaihtoehto BACS (Building Automation and Control Systems) suuremmille kiinteistöille. Järventausta ym. (2015) viittaa D:n vaihtoehdossa myös vaihtokelpoisesti HEMS-järjestelmään (Home Energy Management system), jota edellä mainittu standardi ei määritä mutta joka on kuitenkin Nacer ym. (2017) mukaan yleisesti esiintyvä termi leistyville kodin energianhallintajärjestelmille. Kyseiset energianhallintajärjestelmät eivät kuitenkaan välttämättä täytä standardin vaatimuksia rakennusautomaatiojärjestelmälle ja lisäksi Moellerin (2015) mukaan alalla pyritään, ainakin isojen kiinteistöjen kohdalla, yleisesti erottelemaan energianhallintajärjestelmän ja rakennusautomaatiojärjestelmän termit toisistaan, sillä rakennusautomaatiojärjestelmä ei välttämättä sisällä energianhallintajärjestelmää eikä energianhallintajärjestelmä välttämättä sisällä rakennusautomaatiojärjestelmää. Terminologiahaasteista huolimatta rakennusautomaatiojärjestelmillä voidaan siis yhdistää useita erillisiä laitteita tai pienempiä rakennusautomaatiojärjestelmiä integroiduksi kokonaisuudeksi (kuva 19). Toisin sanoen vaihtoehto C:n komponentit olisivat integroitavissa vaihtoehto D:n ja etenkin E:n järjestelmävaihtoehtoihin, tietyin edellytyksin. Hierarkkisesti tarkasteltuna energianhallintajärjestelmän istuisi rakennusautomaatiotason yläpuolella, analysoiden ja optimoiden rakennuksen energian käyttöä.



Kuva 19. Esimerkki integroidusta automaatiojärjestelmästä (RIL 267-2015 Käyttäjälähtöinen älyrakennus 2015: 13).

Kaukolämpöjärjestelmän kysyntäjouaston järjestelmäratkaisuista ei ole vielä tarkempia tutkimuksia mutta käsitellyn kirjallisuuden perusteella ratkaisu voidaan kuitenkin ajatella koostuvan seuraavista sähkön kysyntäjouaston järjestelmäratkaisuja vastaavista kolmesta vaihtoehdoista: A) ohjaustieto tuodaan kaukolämmön mittauskeskukselta kaukolämpökeskukselle, joka ohjaa lämmitysverkoston säätöventtiiliä, B) ohjaustieto tuodaan erillisen järjestelmän (esim. internet) kautta ohjattavalle laitteelle/laitekokonaisuudelle (IoT-kokoonpano), ja C) ohjaustieto tuodaan erillisen järjestelmän (esim. internet) kautta joko rakennuksen tai asunnon automaatiojärjestelmälle.

3.4 Kysyntäjoustostrategiat

Kysyntäjoustoissa ei voida sammuttaa laitteita tai vähentää lämmitystehoa valikoimattomasti vaan kysyntäjouaston ohjaustekninen toteuttaminen tulee suunnitella. Tällöin puhutaan kysyntäjoustostrategiasta, jolla varmistetaan, että kysyntäjousto suoritetaan mahdollisimman tehokkaasti aiheuttamatta haittaa käyttäjille, laitteille tai rakennukselle (Motegi ym. 2007: 10).

Kysyntäjoustostrategian onnistunut täytäntöönpano vaatii eteenkin taloteknisten järjestelmien kohdalla systeemijättelua, sillä talotekniset järjestelmät ovat usein suoraan tai välillisesti yhteydessä toisiinsa tai vaikuttavat toisiinsa ympäristön kautta. Lisäksi yksittäinen järjestelmä sisältää nimensä mukaisesti jo monta liikkuvaa komponenttia, joiden yhteistoimintaa ja vaikutus ympäristöön tulee ymmärtää. Onnistuneessa kysyntäjou-

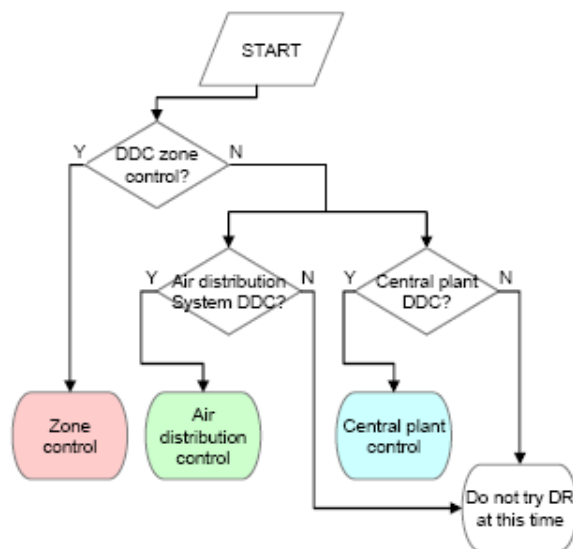
tostrategiassa kaikki taloteknisen järjestelmän komponentit toimivat koordinoitusti kysyntäjoustotapahtuman käynnistämisestä sen päättämiseen, ottaen huomioon myös mahdolliset jälkihuiput (Automated Demand Response in New Construction: Technical Design Guidelines 2014: 25).

Käytettävissä olevat kysyntäjoustostrategiat riippuvat muun muassa rakennustyyppistä, kysyntäjoustossa hyödynnettävästä laitteista tai järjestelmistä sekä ohjausjärjestelmien laajuudesta. Taloteknisten järjestelmien kysyntäjoustostrategioita määrittäessä hyödynnettävät strategiat voidaan prioriteettijärjestyksessä jakaa kolmeen tasoon:

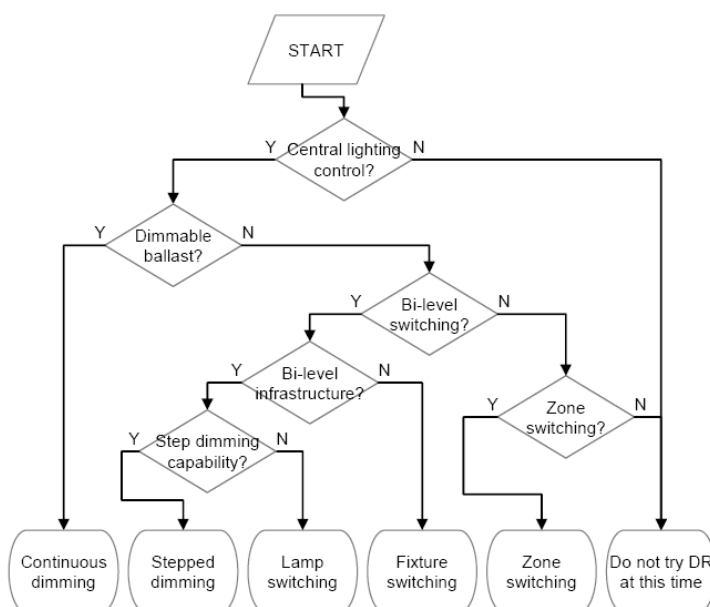
- vyöhykkeisiin kohdistuvaan ohjaukseen;
- ilmanjakeluun kohdistuvaan ohjaukseen; tai
- tuotantoon kohdistuvaan ohjaukseen.

(Motegi ym. 2007: 10–8)

Tasojen hyödynnettävyyttä voidaan LVI-järjestelmille arvioida esimerkiksi kuvan 20 mukaisesti, jossa DDC-järjestelmällä (eng. Direct Digital Control) tarkoitetaan Suomessa vuonna 1980-luvulla yleistyneitä ohjelmoitavia digitaalisia säätöjärjestelmiä (Sandberg 2014: osa 1: 287-310). Vastaavat kriteerit valaistuksen kysyntäjoustostrategioiden hyödynnettävyyteen on esitetty esimerkkinä kuvassa 21.



Kuva 20. Hyödynnettävissä olevien taloteknisiin järjestelmiin kohdistuvien kysyntäjoustostrategioiden valintapuu (Motegi ym. 2007: 11).



Kuva 21. Hyödynnettävissä olevien valaistusjärjestelmiin kohdistuvien kysyntäjoustostrategioiden valintapuu (Motegi ym. 2007: 15).

Vyöhykkeisiin kohdistuva ohjaus, kuten esimerkiksi sisälämpötilojen asetusarvojen muuttaminen (eng. Global temperature adjustment tai GTA), on strategiana hyvin tehokas, sillä siinä ei rajoiteta minkään järjestelmän toimintaa vaan vyöhykkeiden asetusarvojen muuttaminen on osa rakennuksen tavanomaista toimintaa. Toisin sanoen järjestelmät reagoivat asetusarvojen muutokseen rakennuksen tavanomaisten ohjaus- ja säätöjärjestelmien mukaisesti. (Motegi ym. 2007.)

Ilmanjakeluun kohdistuvassa ohjauksessa, kuten esimerkiksi ilmanvaihtokoneen puhallinnopeuden muuttamisessa, vaikutukset toisiin järjestelmiin ja ympäristöön on vaikeammin hallittavissa. Tässä strategiassa tulee huomioida kaikki mahdolliset muut järjestelmät, jotka saattava reagoida ilmapirran rajoittamiseen. Tämä saattaa tehdä strategian toteuttamisesta hyvin monimutkaisen, mikäli rakennuksessa on useita vyöhykekohtaisia järjestelmiä. Lisäksi riskinä on, että ilmanjakojärjestelmän päässä sijaitsevan tilan ilmanvaihto jää vajaaksi, johtuen paineen riittämättömyydestä. (Motegi ym. 2007.) Ilmanjakelun kysyntäjoustoa kohtaan on varsinkin asuinrakennusten osalta esitetty huolia vastuista, mikäli mahdolliset sisäilmaongelmat katsotaan johtuneen ilmanjakelun kysyntäjoustosta. Suuremmissa kiinteistöissä, kuten toimistorakennuksissa, ilmanvaihdon osuus lämmitysenergiasta on niin suuri, että niiden kysyntäjoustonpotentiaalia on energiyhtiöiden näkemysten mukaan kuitenkin syytä tutkia. (Kaukolämmön kysyntäjousto 2015: 24–5, 29.)

Tuotantoon kohdistuva ohjaus, kuten esimerkiksi lämmitysverkostojen menolämpötilan muuttaminen, on strategiana saman tyyppinen kuin ilmanjakeluun kohdistuva ohjaus, eli vaikeasti hallittavissa, sillä muutokseen reagoiviin järjestelmiin sisältyy yleensä muiden järjestelmien lisäksi itse edellä mainittu ilmanjakojärjestelmä. (Motegi ym. 2007.)

Luvussa 4 käsitellään joitakin lämmityksen kysyntäjoustoon liittyviä kysyntäjoustostrategioita mutta kaikkien mahdollisten kysyntäjoustostrategioiden yksityiskohtainen esittäminen ei ole tämän työn laajuudessa kuitenkaan mahdollista, sillä periaatteessa strategioita ja niiden variaatioita on olemassa yhtä monta kuin erilaisia taloteknisiä järjestelmiä ja niiden rakennuskohtaisia variaatioitakin. Strategioiden toteutettavuuteen vaikuttavat monet tekijät mutta varsinkin alimitoitettu LVI-järjestelmä voi huippukulutustilanteessa estää kysyntäjoustostrategian toteuttamisen kokonaan, sillä järjestelmä teho on jo siinä tilanteessa rajoitettu. Myös voimassa olevat asetusarvot kysyntäjoustotapahtuman aikana voi rajoittaa strategian hyödynnettävyyttä, mikäli ne ovat jo määritettyjen raja-arvojen mukaisia. Mietittäviä asioita kysyntäjoustostrategioita suunniteltaessa ja toteutettaessa ovat ainakin seuraavat:

- Minkä tyyppisille taloteknisille järjestelmille strategia on soveltuva?
- Mille markkinoille pyritään osallistumaan ja mikä on vaadittu vasteaika?
- Pyritäänkö strategialla leikkaamaan, siirtämään tai rajoittamaan huippukulutusta?
- Millaisille kuormille strategia kohdennetaan tai millaiset kuormat ovat hyödynnettävissä?
- Miten kuormanpudotuksen teho arvioidaan tai voidaan arvioida?
- Millaisia ohjaus- ja säätöjärjestelmiä tarvitaan strategian toteuttamiseksi?
- Miten nopeasti kuormanpudotus voidaan järjestelmäteknisesti saavuttaa? Tuleeko ohjaus käynnistää ennen varsinaista kysyntäjoustotapahtumaa?
- Mikä on strategian ohjausjärjestys ja millaisia raja-arvoja järjestelmillä on?
- Mikä on strategian vaikutus ihmisiin, laitteisiin ja järjestelmiin sekä ympäristöön?
- Miten ulkoiset tekijät kuten säätilaa, ihmiset ja muut laitteet huomioidaan?
- Miten käyttäjä pystyy keskeyttämään kuormanpudotuksen?
- Miten kuormanpudotus mitataan ja todennetaan?
- Miten kysyntäjoustotapahtumasta palaututaan? Voiko strategia aiheuttaa jälkipiikin?

(Motegi ym. 2007: 19–46; Automated Demand Response Using OpenADR 2011: 14–33.)

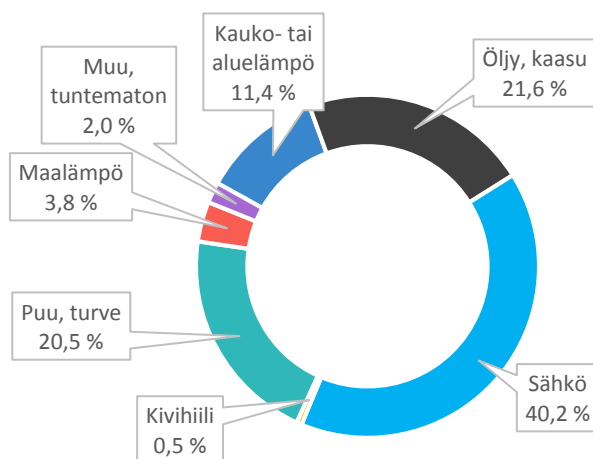
Kun edellä mainitut asiat on käsitelty ja järjestelmä valmis käyttöön otettavaksi, kysyntäjoustopuolelle on suositeltava järjestää testitilaisuus (Motegi ym. 2007: 47–8) tai toimintakokeet, aivan kuten muidenkin taloteknisten järjestelmien käyttöönotossa (Sandberg 2014: 498). Tällöin rakennuksessa voidaan käynnistää erityyppisiä kysyntäjoustopilanteita manuaalisesti ja verrata toteutuneita kuormanpudotustehoja laskennallisesti arvioituihin kuormanpudotustehoihin (Motegi ym. 2007: 47–8). Kysyntäjousto on vain pieni osa rakennuksen toimintoja, joten tärkeä on myös varmistaa asianmukainen ohjausjärjestys (kuten esimerkiksi kuvassa 22) (Järventausta ym. 2015: 155–6; Motegi ym. 2007: 47–8), sillä aivan kuten energiatehokkuuden parantamisessa, ei rakennuksen pääasiallinen tarkoitus ole energian säästäminen eikä sen tarkoitus ole myöskään kysyntäjoustopuolella tehojen leikkaaminen.



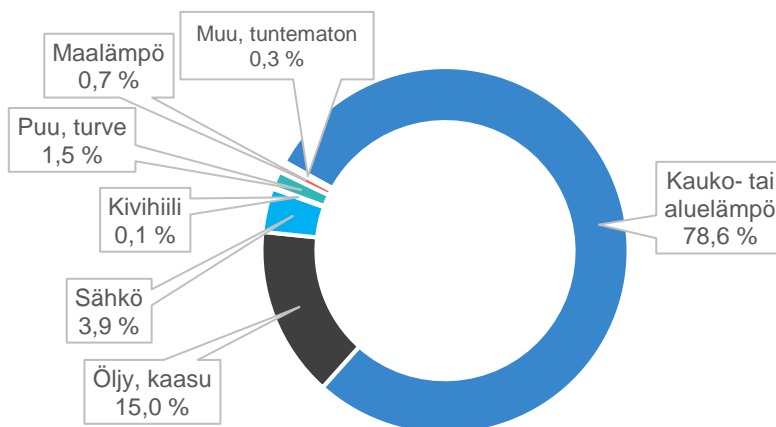
Kuva 22. Esimerkki kysyntäjoustopuolella ohjausjärjestyksestä ja toimintojen priorisoinnista (mukautettu Järventausta ym. 2015: 156).

3.5 Kysyntäjousto asuinrakennuksessa

Suomen asuinrakennuskannasta noin 60 000 kappaletta ovat asuinrakennuksia (4,6 %), noin 81 000 kappaletta riv- ja ketjutaloja (6,2 %) ja noin 1 150 000 kappaletta erillisiä pientaloja (89,1 %) (Rakennukset käyttötarkoituksen ja lämmitystavan mukaan 2016). Pien- ja rivitalot, eli suurin osa asuinrakennuksista, lämpenevät yleensä sähköllä, kun taas asuinrakennukset kauko- tai aluelämmöllä (kuvat 23-24). Tämän perusteella pien- ja rivitalot muodostavat merkittävän potentiaalin sähkön kysyntäjoustopuolella näkökulmasta ja asuinrakennukset vastaavasti kaukolämmön kysyntäjoustopuolella.



Kuva 23. Kaikkien asuinrakennuksien lämmitysmuodot polttoaineen mukaan (lkm) (Rakennukset käyttötarkoituksen ja lämmitysaineen mukaan 2016).



Kuva 24. Vain asuinkerrostalojen lämmitysmuodot polttoaineen mukaan (lkm) (Rakennukset käyttötarkoituksen ja lämmitysaineen mukaan 2016).

Asuinkerrostalot ovat pien- ja ketjutaloihin ja myös moniin muihin rakennustyyppeihin verrattuna hankalammin hyödynnettävissä sähkön kysyntäjouaston sovelluksiin. Tämä johtuu siitä, että asuinkerrostaloissa ohjattavissa oleva kuorma on yleensä hajanaista ja yksittäiset tehot hyvin vaatimattomia. (Järventausta ym. 2015: 121–2.) Lisäksi on arvioitu, että asuinrakennuskannan kokonaisuudesta vain noin 10 prosentissa on rakennusautomaatiojärjestelmä (Järventausta ym. 2015: 104), joten lähtökohdat ovat ohjauksen kannalta hyvin rajalliset ja kysyntäjouaston toteuttaminen vaatii useimmissa tapauksissa uusien järjestelmien asentamista.

Asuinkerrostalojen suunnitteluvaiheessa ei lähtökohtaisesti ole otettu huomioon kuorman ohjausmahdollisuuksia ja asuinkerrostaloissa yleisesti käytetty sähkön järjestelmä-rakenne on kysyntäjouaston kannalta ongelmallinen. Etäluettavat sähkömittarit sijaitsevat

tavallisesti eri tilassa kuin ryhmäkeskukset eikä näiden välissä kulje ohjauskaapelia. Tästä syystä sähkömittaria ei voida suoraan hyödyntää kuormanohjauksiin ilman uusien kaapeleiden asentamista. (Järventausta ym. 2015.) Koska yhteyksien lisääminen jälkeenpäin on kustannusraskasta kuormien hajanaisuudesta johtuen (Järventausta ym. 2015: 121–2, 150–1), internetiin kytketyn langattoman järjestelmän tai langattomien järjestelmien hyödyntäminen asuinkerrostalojen kohdalla vaikuttaa varteenotettavalta vaihtoehdolta, varsinkin olemassa olevien rakennusten osalta. Uudisrakentamisessa mahdollisuudet ovat taas monipuolisemmat ja voidaan nähdä riippuvan pääosin hankkeen tavoitteista.

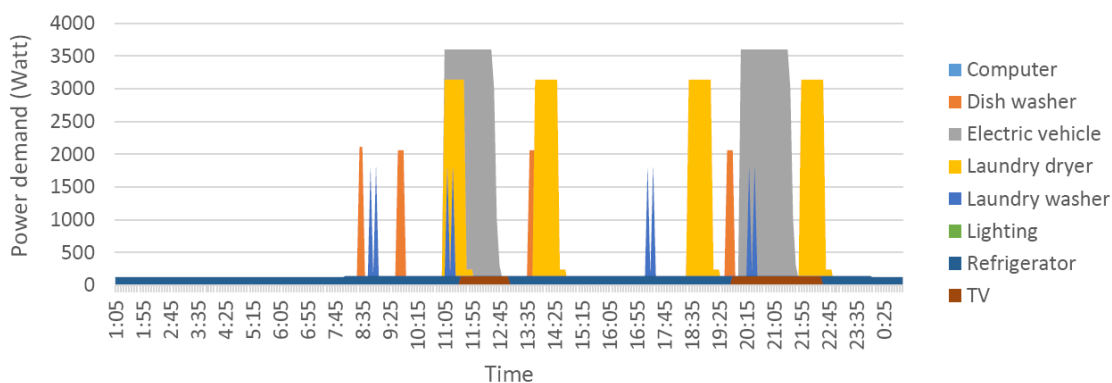
Sähkön kysyntäjoustopotentialin kannalta autolämmitykset, kiukaat ja mahdolliset sähkökäyttöiset lattialämmitykset muodostavat asuinkerrostaloissa suurimmat yksittäiset ohjattavissa olevat kuormat (Järventausta ym. 2015: 122). Päivittyvän rakennusten energiatehokkuusdirektiivin (2018/844) perusteella asia voi lähitulevaisuudessa kuitenkin muuttua, sillä autojen sähkönlatauspaikkojen lisääminen eivät ainoastaan lisää joustopotentialia vaan niihin kytketyt autot muodostavat myös mahdollisen energiavaraston. Lisäksi lämpöpumput ovat yleistymässä asuinkerrostalojen lämmitysmenetelmänä, joiden myötä sähkön huipputehontarve kasvaa ja lisää tarvetta kysyntäjoustolle (Järventausta ym. 2015: 122).

Asuinrakennusten kuluttajalaitteet ja kodinkoneet jakautuvat niiden selkeästi eroavista kulutusprofiileista ja käyttötavoista johtuen useaan eri ryhmään kuormien siirrettävyyteen ja vähennettävyyteen perustuen. Yksi tapa erotella näitä laitteita on jakaa ne siirrettäviin ja ei siirrettäviin kuormiin, josta siirrettävät kuormat jaetaan edelleen keskeytettäviin ja ei keskeytettäviin kuormiin ja vastaavasti ei siirrettävät kuormat jaetaan edelleen vähennettäviin ja ei vähennettäviin kuormiin. (A. Azar ym. 2015.) Tämä erittelytapa on esitetty selkeämmin kuvassa 25. Kysyntäjoustossa tuleekin käyttää erityistä huolellisuutta eri kuormien ja kulutustyyppien ryhmityksien suunnittelussa (RIL 267-2015 Käyttäjälähtöinen älyrakennus 2015: 128–9; Järventausta ym. 2015: 164–5).

Kuluttajakuormat	Siirrettävä kuorma	Keskeytettävissä	Sähköauton lataus Tilajäähdytys Lämpöpumppu
		Ei keskeytettävissä	Astianpesukone Pyykinpesukone Kuivausrumpu Imuri Liesi/uuni Mikroaaltouuni
	Ei siirrettävä kuorma	Vähennettävissä	Televisio Tietokone
		Ei vähennettävissä	Valaistus Jääkaappi/pakastin

Kuva 25. Kotitalouksien kuormien luokittelu kysyntäjoustopotentialin näkökulmasta (mukautettu A. Azar ym. 2015: 33).

Ei siirrettäviä kuormia edustavat yleensä kodin elektroniikka sekä jääkaapit ja pakastimet ja siirrettäviä kuormia edustavat yleensä muut kodinkoneet ja talotekniset järjestelmät (A. Azar ym. 2015). Erään arvion mukaan pyykinpesukone ja -kuivain sekä astianpesukone muodostavat mainitusta laitteista suurimman tehontarpeen (kuva 26).



Kuva 26. Kuluttajalaitteiden ja kodinkoneiden tehontarve tyypillisellä päivällä (A. Azar ym. 2015: 32).

Kaukolämmön kysyntäjousto vaikuttaa kysyntäjoustopotentiaalin näkökulmasta olevan sähkön kysyntäjoustoja kannattavampi ratkaisu, sillä noin 79 prosenttia – eli suurin osa asuinkerrostaloista käyttävät lämmitysmuotonaan kauko- tai aluelämpöä (Rakennukset

käyttötarkoituksen ja lämmitysaineen mukaan 2016). Kuten aikaisemmin mainittu, kaukolämmön lämmönjakokeskus ja mittauskeskus sijoitetaan useimmiten yhteiseen tilaan (lämmönjakohuone) ja nykyisissä mittauskeskuksissa on kysyntäjousto mahdollistava kaksisuuntainen tiedonsiirto. Mikäli ohjaus tehdään suoraan lämmönjakokeskuksessa, tarjoaa siis kaukolämmön kysyntäjousto huomattavasti yksinkertaisemman toteuttamismallin sähkön kysyntäjoustoan verrattuna. Kaukolämpöön liittyviä kysyntäjoustostrategioita tutkitaan tarkemmin osiossa 4.

Asuinkerrostalon kysyntäjouston hyödyntämiseen soveltuvia järjestelmäratkaisuja tarkasteltaessa voidaan käsitellyn kirjallisuuden perusteella todeta, että soveltuva ratkaisu on hyvin riippuvainen asuinkerrostalosta, sen teknisestä toteuttamistavasta ja halutun kysyntäjouston laajuudesta. Tästä syystä yhtä optimaalista ratkaisua ei ole järkevä tai edes mahdollista yksiselitteisesti määrittää, ainakaan kustannus-, energia- ja elinkaari-tehokkuuden näkökulmat huomioiden. Tämä seuraa myös rakennushankkeiden luonnetta yleisellä tasolla, jossa käytettävät ratkaisut ovat rakennushankkeen tavoitteista riippuvaisia (Sandberg 2014: 14–26).

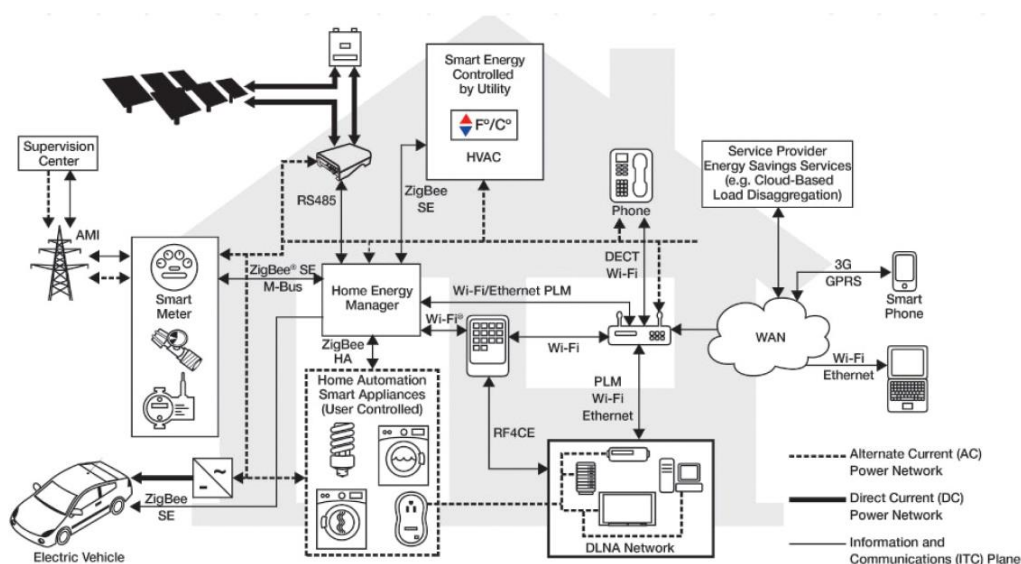
Periaatteessa kysyntäjouston ohjaus on toteutettavissa hyvin pelkistetyksi esimerkiksi yhdellä internetiin kytketyllä älylaitteella (jolla on kaikki kysyntäjoustoan vaadittavat ominaisuudet) mutta yleisesti katsottuna asuinkerrostalon kysyntäjousto ei todennäköisesti ole kannattavaa lähteä toteuttamaan vain kysyntäjouston nimissä (Aarup ym. 2014: 35), vaan järkevää olisi hyödyntää siihen vaadittua teknologiaa myös muiden toiminnallisuuksien tuomiseen rakennukseen, kuten käyttäjän mukavuutta parantavien toiminnallisuuksien, energianseuranta- ja optimointipalveluiden sekä älykkäiden oppivien säätöjärjestelmien mahdollistamiseen. Kuten on aikaisemmin todettu, tämänkaltaiset ratkaisut ovat myös yhtenevät kuluttajien intressien kanssa ja lisäksi lähestymistapa seuraa rakennusalan merkittävää trendiä, jossa niin kutsuttuja älykkäitä teknologioita hyödynnetään rakennuksissa eri käyttötarkoituksiin monipuolisesti (RIL 267-2015 Käyttäjälähtöinen älyrakennus 2015: 7). Tällöin puhutaan älyrakennuksesta (eng. Smart Building), jonka edistämiseen myös Euroopan unioni on uudistetun rakennusten energiatehokkuusdirektiivin (2018/844) myötä sitoutunut.

Eräs tämänkaltaisen (esimerkiksi asuntokohtainen) järjestelmäratkaisu kysyntäjouston toteuttamiseksi asuinkerrostaloissa on niin kutsuttu kodin energiahallintajärjestelmä (HEMS), jonka periaatteita Euroopan unionin rahoittaman kotitalouksien kysyntäjoustoan tutkivan SEMIAH-hankkeen malli (A. Azar ym. 2015) myös hyödyntää. Kodin energian-

hallintajärjestelmät ovat kasvava ilmiö rakennusallalla mutta järjestelmän toiminnallisuudet ovat epämääräisellä pohjalla, sillä järjestelmälle ei näytä löytyvän standardoitua määritelmää (Bojanczyk 2013). Monet ratkaisutoimittajat yhtyvät määritelmään, joka määrittelee HEMS-järjestelmän seuraavasti:

Järjestelmä joka kattaa minkä tahansa tuotteen tai palvelun, joka valvoo, ohjaa tai analysoi kodin energiaa (Bojanczyk 2013).

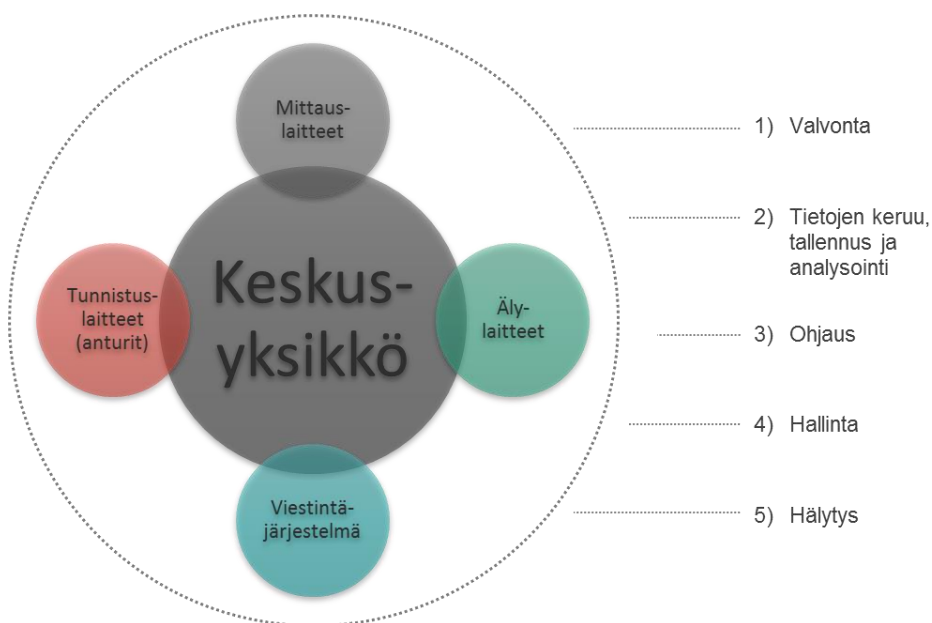
Tämä on kuitenkin hieman ongelmallinen määritelmä, sillä kun järjestelmien markkinointi on siirtynyt valtavirtaan (Bojanczyk 2013), saatetaan markkinoida myös hyvin suppeilla toiminnallisuuksilla varustettuja HEMS -nimellä kulkevia järjestelmiä, jotka eivät välttämättä ole kovin muuntojoustavia. Järjestelmän kokoonpanon määrittelyssä korostuu siis monipuolisuus ja järjestelmäintegraation tärkeys ja avoimien rajapintojen suosiminen, joka on oleellinen osa-alue käyttäjälähtöisen älyrakennuksen suunnittelua (RIL 267-2015 Käyttäjälähtöinen älyrakennus 2015: 65–6). Kuvassa 27 on esitetty yksi esimerkki HEMS-kokoonpanossa hallittavista laitteista ja tiedonsiirtomenetelmistä, joka havainnollistaa järjestelmäintegraation tärkeyttä kokoonpanoa määrittäessä. Suomessa vastaavia järjestelmiä ja/tai energianhallinta- ja optimointipalveluita tarjoavat yritykset kuten Salusfin, There Corporation, Fourdeg, Cleworks, Optiwatti ja Leanheat, vain muutamia mainitakseni. Kansainvälisesti myös yritykset kuten OhmConnect ja REstore, ovat vastaavia toimijoita varsinkin kysyntäjoustomarkkinoilla.



Kuva 27. Esimerkki erilaisten järjestelmien ja tiedonsiirtomenetelmien kirjosta ja monimutkaisuudesta jo asuinrakennuksen tasolla, jossa keskiössä on HEMS-järjestelmä (Anvari-Moghaddam ym. 2016: 33).

Nacerin ym. (2017) tekemä kattava kirjallisuustutkimus tunnisti kuitenkin HEMS-ratkaisun keskeisiä toiminnallisuuksia ja pääasiallisen kokoonpanon (kuva 28), jota voidaan pitää yhtenä mallina HEMS-järjestelmää määrittäessä, sillä se täyttää edellytykset kysyntäjouaston toteuttamiseksi mutta mahdollistaa myös muita toiminnallisuuksia monipuolisesti. Tällöin järjestelmän fyysinen kokoonpano koostuisi hieman mukautettuna:

- älykkäästä mittausjärjestelmästä, joka mahdollistaa energian reaaliaikaisen mittaamisen ja tiedon edelleen välittämisen;
- tunnistuslaitteista, eli antureista, joilla mitataan oleellisia suureita (lämpötila, paikallaolo, valoisuus jne.);
- älykkäistä viestintään kykenevistä kodinkoneista ja sähkölaitteista;
(*Älykkäät kodinkoneet ovat vielä tuore ilmiö mutta Kansainvälisen energiajärjestön (IEA) arvion mukaan peräti 11 miljardia älykästä kodinkonetta voi osallistua sähköverkon tasapainon ylläpitämiseen vuoteen 2040 mennessä (Digitalization and Energy 2017: 17)*)
- viestintäjärjestelmästä, esimerkiksi langattomasta (Thread, ZigBee, EnOcean, Z-Wave, Wi-Fi jne.), jonka avulla mittausjärjestelmät, anturit ja sähkölaitteet pystyvät lähettämään ja vastaanottamaan tietoa; ja
- älykkäästä keskusyksiköstä, jolla laitteet integroidaan yhdeksi kokonaisuudeksi ja joka hallitsee ja optimoi laitteiden käyttöä ja keskustelee käyttäjien sekä rakennusten ulkopuolisten osapuolten kanssa (sähkönmyyjä, aggregaattori jne.) esimerkiksi kysyntäjouaston ja muiden energianhallintapalveluiden mahdollistamiseksi.



Kuva 28. HEMS-ratkaisun kokoonpano ja keskeiset toiminnallisuudet (mukautettu Nacer ym. 2017: 92).

lämmityksen kysyntäjouston älykkääseen ohjaamiseen liittyviä ratkaisuja löytyy jo markkinoilta.

Vaikka lämmityksen kysyntäjouston älykkääseen hallintaan löytyy jo ratkaisuja, liittyy siihen kuitenkin käytännön haasteita, mikäli syntyvät säästöt halutaan kohdistaa asuntokohtaisesti asuntojen lämmitystehoa ja -energiankulutusta mittaamalla. Suomessa ei yleisesti mitata lämmitysenergiankulutusta asuntokohtaisesti ja lisäksi sitä ei voida pelkästään mittaamalla kohdentaa tasa-arvoisesti, vaan kohdentamisessa tulee ainakin huomioida missä asunto sijaitsee suhteessa rakennukseen (mm. eroava lämpöhäviö ja aurinkokuorma), miten asunnon ympäröivät tilat vaikuttavat lämmitystarpeeseen (eri lämpötilat) ja mitä lämmönluovutusmenetelmiä asunnossa käytetään (Vainio ym. 2017: 6).

Suomen asuinkerrostaloissa lämmönjakelu on yleensä järjestetty siten, että jokaisen asunnon läpi kulkee useita lämmitysnousuja pystysuorassa, johon eri tilojen radiaattorit on liitetty. Tällöin jokainen radiaattori tarvitsee oman mittauslaitteen, joka tietenkin nostaa mittausjärjestelmän kustannuksia. Mittauslaitteet voivat esimerkiksi olla radiaattoriin asennettavaa mallia tai radiaattorin meno- ja paluuputkiin asennettavaa mallia kuvan 30 mukaisesti. (Vainio ym. 2017: 9–18.)



Kuva 30. Radiaattorikohtaiset lämmitysenergian mittauslaitteet. Vasemmalla radiaattoriin asennettava malli ja oikealla radiaattorin meno- ja paluuputkiin asennettava malli. (Vainio ym. 2017: 13.)

Euroopan unionin energiatehokkuusdirektiivi (2012/27/EU) velvoittaa jäsenvaltioita mitata ja laskuttamaan asuinkerrostalojen lämmityksen kulutusta asuntokohtaisesti, mikäli se on teknistaloudellisesti perusteltavissa. Direktiivin mukaan tällä voidaan saavuttaa energiansäästöjä asukkaiden kulutustottumusten muutoksista, kuten ikkunatuuletuk-

sen vähentymisellä. VTT:n tutkimusten mukaan Suomessa hyödynnetään ikkunatuule-
tusta kuitenkin hyvin harvoin, sillä uudemmissa rakennuksissa on mekaaninen ilman-
vaihto, joten ikkunatuuletuksen vähentymisellä ei juuri saavuteta säästöjä. Tutkimuksen
mukaan mittausjärjestelmän asentaminen ja käyttö nostaa myös lämmityksen käyttökus-
tannuksia uusissa ja peruskorjatuissa rakennuksissa siten, että se voi kumota rakennuk-
sen älykkäällä energianhallintajärjestelmällä saavutettuja säästöjä täysin. Samanaikai-
sesti energianhallintajärjestelmien tarve kuitenkin korostuu kysyntäjouoston lisääntyvästä
tarpeesta johtuen. (Vainio ym. 2017.)

Edellisen perusteella lämmitysenergian asuntokohtaiseen mittaamiseen ja sitä kautta
kustannusten kohdistamiseen liittyy monia käytännön ja teknistaloudellisia haasteita. Tä-
män vuoksi myös Helsingin kaupunki ei toistaiseksi mittaa lämmitysenergiankulutusta
asuntokohtaisesti omistamissaan asuinkerrostaloissa (Vainio ym. 2017: 18) ja Suomen
Kiinteistöliitto ry:n kanta on, että asuntokohtainen lämmitysenergian mittaaminen ja sitä
kautta lämmityskustannusten jako ei Suomessa ole teknistaloudellisesti perusteltavissa
(Pylsy ym. 2017).

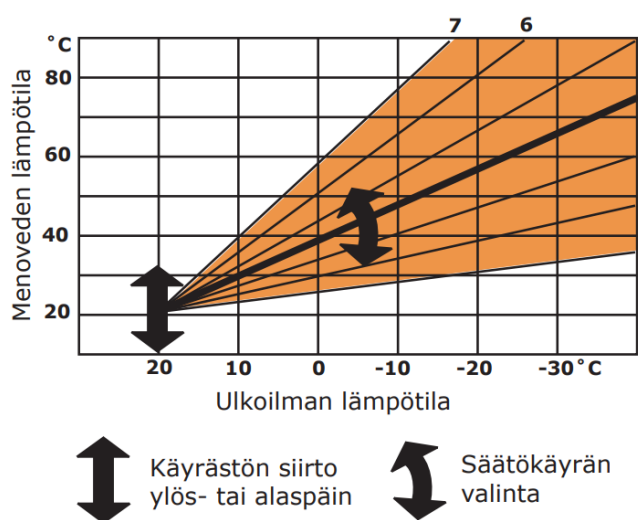
4 Lämmityksen kysyntäjouoston mallinnus ja simulointi asuinkerrosta- lossa

Tässä osiossa perehdytään kysyntäjouoston tutkimus- ja mallinnusmenetelmiin ja tutki-
taan kysyntäjouostostrategioita rakennussimulointiohjelmistoa hyödyntäen. Työn tekni-
sen suuntauksen ja asuinkerrostalojen kaukolämmön kysyntäjoustopotentiaalin myötä
rakennussimuloinnissa tarkastellaan kysyntäjouostoa termisen joustavuuden ja kahden
yleisen kysyntäjouostostrategian näkökulmasta: lämmitysverkoston menolämpötilan ase-
tusarvon poikkeuttaminen tai vyöhykkeiden sisälämpötilan asetusarvon poikkeuttami-
nen. Lisäksi selvitetään huipputehon rajoitusohjelman hyödynnettävyyttä tapaustutki-
muskohteessa. Asetusarvon poikkeuttamisella tarkoitetaan tässä yhteydessä asetusar-
von muuttamista niin kutsutusta perusasetusarvosta. Esimerkiksi mikäli perusasetusar-
vona on 21 °C ja sitä poikkeutetaan -1 °C, on asetusarvo poikkeutettuna 20 °C.

4.1 Aiemmat tutkimukset ja niissä käytetyt menetelmät

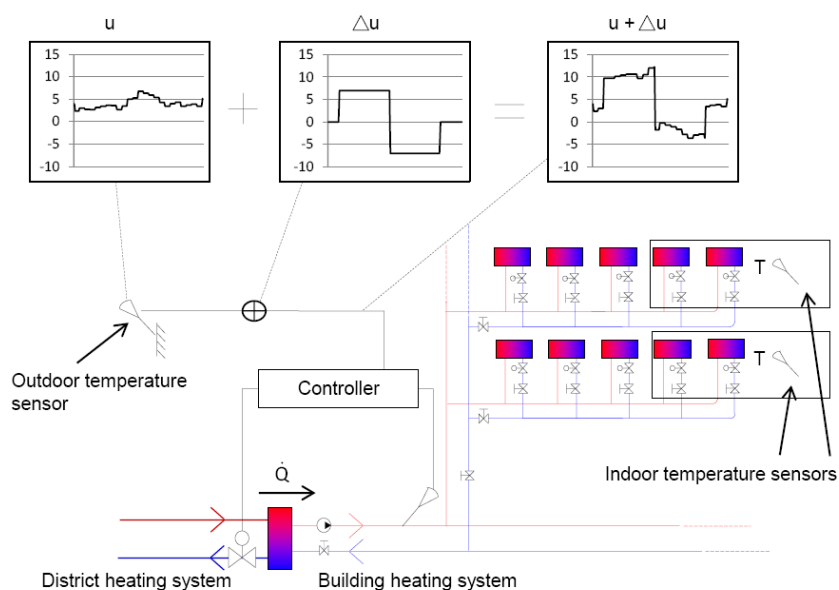
Kysyntäjouaston potentiaalia sekä sen vaikutusta rakennuksen sisäolosuhteisiin on tutkittu jonkin verran sekä sähkö- että kaukolämpöjärjestelmien osalta ja tässä paneudutaan kaukolämmön kysyntäjouaston aiempiin tutkimuksiin ja niissä käytettyihin menetelmiin ja tuloksiin lyhyesti.

Kärkkäinen ym. (2003) tutki kaukolämmön kysyntäjoustoja kahdessa toimistorakennuksessa ja yhdessä vanhainkodissa. Toimistorakennuksista yksi sijaitsi Saksan Mannheimissa ja toinen toimistorakennus sekä vanhainkoti sijaitsivat Suomen Jyväskylässä. Tutkimuksen tavoitteena oli osoittaa kysyntäjouaston tuomia kustannushyötyjä kaukolämpöjärjestelmässä ja kehittää ainakin sen ajan optimaalisia ohjausstrategioita jouaston toteuttamiseksi. Jyväskylän kohteissa kysyntäjousto toteutettiin lämmitysverkoston menoveden säätökäyrän asettelun muuttamisella siten, että kysyntäjoustotapahtumassa käyrää siirrettiin alkuperäisen käyrän alapuolelle (enintään -60 %) ja mahdollisessa esilämmitystilanteessa alkuperäisen käyrän yläpuolelle (esimerkki periaatteesta on esitetty kuvassa 31). Rakennusten lämmitystehoa säädettiin tällä menetelmällä 2–3 h siten, että sisälämpötila muuttui enintään 2 °C molempiin suuntiin. Näin saavutettiin keskimäärin 20–25 % tehonpudotus rakennuksen lämmitysjärjestelmässä. Kärkkäinen ym. (2003) mukaan tällä menetelmällä kaukolämpöverkko voi leikata kokonaiskuormansa jopa 25 %, mikäli menetelmää hyödynnetään useissa rakennuksissa samanaikaisesti.



Kuva 31. Havainnointi lämmityksen menoveden säätökäyrän asettelusta (Käytä kaukolämpöä oikein 2007: 9).

Myös Kensby (2015) lähestyi kaukolämmön kysyntäjoustoa samankaltaisilla menetelmillä tutkiessaan rakennusten hyödyntämistä kaukolämpöverkon lyhytaikaisena lämpövarastona. Tutkimus kohdistui viiteen vuosina 1939–1950 rakennettuihin asuinkerrostaloon (3–5 kerrosta), jotka kaikki sijaitsivat Ruotsin Göteborgissa. Kysyntäjousto toteutettiin poikkeuttamalla ulkolämpötilan mittaustulosta (suurimmillaan $\pm 7\text{ }^{\circ}\text{C}$), joka välillisesti vaikutti lämmitysverkoston menolämpötilan asetusarvoon (kuva 32). Rakennuksen lämmitystehoa säädettiin tällä menetelmällä siten, että ensin rakennusta esilämmitettiin 9 tuntia, jonka jälkeen lämmitystehoa leikattiin 9 tuntia, minkä jälkeen ulkolämpötilan mittaustulos palautettiin normaaliksi 3 tunniksi. Tällä menetelmällä yhden testisyklin pituus oli 21 tuntia, jonka myötä kysyntäjoustotapahtuman ajankohta siirrettiin automaattisesti vuorokauden (24 h) sisällä. Tutkimuksen mukaan menetelmällä voitiin varata $0,1\text{ kWh/m}^2$ energiaa betonirunkoisiin rakennuksiin (varastoitu energia suhteessa rakennuksen lattiapinta-alaan), pitäen vaikutukset sisälämpötilaan useimmiten $\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$:n sisällä. Tulosten perusteella arvioitiin, että Göteborgin kaukolämpöverkon kuormanvaihteluita voisi vähentää rakennusten termistä massaa laajasti hyödyntämällä jopa 50 % ja vastaavasti vähentää huippulämpölaitoksien käyttöä jopa 20 %.



Kuva 32. Lämmitysverkoston menolämpötilan asetusarvon poikkeutus ulkolämpötilan mittaustulosta muuttamalla, eli $u + \Delta u$ (Kensby 2015: 15).

Edellä mainitut menetelmät soveltuvat hyvin toteutettaviksi myös rakennussimulointiympäristössä mutta simulointi mahdollistaa lisäksi myös sellaisten tutkimusmenetelmien käytön, joiden toteuttaminen todellisessa kohteessa saattaa olla haastavaa. Esimerkiksi

Sarran ym. (2017) tutki rakennusten eri osien ja ominaisuuksien roolia rakennuksen termisen massan hyödyntämisessä kysyntäjoustossa. Tutkimuksessa mallinnettiin Tanskan Kööpenhaminassa sijaitsevan lähes nollaenergiarakennuksen asunto, joka edustaa nykypäiväistä ja tulevaisuuden rakentamista Tanskassa. Tutkimuksen tavoitteena ei ollut simuloida mahdollisimman todenmukaista kysyntäjoustotapahtumaa vaan eristää rakennuskomponenttien ominaisuuksien vaikutusta asunnon termiseen joustavuuteen. Tästä syystä simuloinnissa käytettiin vakioitua säätiedostoa, jossa ulkolämpötila ja suhteellinen kosteus pysyivät muuttumattomana ($-5\text{ °C} / 90\%$) ja auringon säteily käyttäytyi päivästä riippumatta samalla tavalla. Lisäksi tuulen vaikutusta ei huomioitu vaan rakennusvaipalle määritettiin vakio vuotoilmavirta. Tutkimuksessa tarkasteltiin sisälämpötilan pysyvyyttä eri parametreilla ja havaittiin, että rakennusvaipan lämmönläpäisykertoimella (U -arvo ($\text{W/m}^2\text{K}$)) on merkittävä vaikutus rakennuksen termiseen joustavuuteen, sillä rakennuksen termisellä massalla tai lämpökapasiteetilla on ainoastaan hyötyä silloin kuin rakennuksen lämmönläpäisykerroin on riittävällä tasolla. Esimerkiksi betonin eli termisen massan lisäämisellä oli odotettua vähemmän hyötyä mutta sen sijaan ikkunoiden lämmönläpäisykerrointa parantamalla ($2,5\text{ W/m}^2\text{K} \rightarrow 0,75\text{ W/m}^2\text{K}$) havaittiin, että aikaväli jossa olosuhteet pysyivät hyväksyttävänä ($\geq 20\text{ °C}$) piteni 19 tunnista 75 tuntiin. Lisäksi auringon säteilyllä oli merkittävä vaikutus joustettavaan aikaan ja kysyntäjoustotapahtuman jälkeiseen huipputehoon. Tulokset liittyen rakennuksen lämpöhäviöiden merkittävyyteen saattavat olla pitkälti odotettuja mutta selkeästi rakennuksen ulkovaipan lämmönläpäisykerroin voi jo karkeasti kertoa jotain rakennuksen termisestä kysyntäjoustopotentialista ja lisäksi auringonsäteilyn vaikutuksesta johtuen yhden asunnon tuloksia ei kannata yleistää kokonaiselle rakennukselle.

Edellisen perusteella nykyaikaiset rakennukset vaikuttavat soveltuvan hyvin hyödynnettäväksi lämmityksen kysyntäjoustossa mutta toisaalta niiden hyvä lämmöneristävyys tarkoittaa myös pienempää lämmitystehoa ja sitä kautta pienempää kysyntäjoustopotentialia tehollisessa mielessä. Tästä kertoo myös Kontun (2014: 62–72) työssä käsitelty Jokisen (2013) tutkimus, jossa todettiin, että uudemmat rakennukset ovat usein niin hyvin eristettyjä, että niiden kysyntäjoustopotentiali on hyvin vaatimaton. Tutkimuksen mukaan Suomessa vuosina 1940–2002 rakennetut rakennukset soveltuvat parhaiten kysyntäjoustopotentialin tarkoitukseen, sillä rakennusten lämpöhäviö on sisälämpötilojen pysyvyyteen nähden kohtuullinen (tehonpudotuksen aikaan) mutta kuitenkin riittävä lämmityshontarpeen osalta hyödynnettäväksi kysyntäjoustossa.

Edellä käsiteltyjen lämmityksen kysyntäjoustopotentialiin vaikuttavien tekijöiden ja varsinkin niiden yhteisvaikutusta rakennuksen termiseen joustavuuteen voidaan arvioida myös niin

kutsutun termisen aikavakion avulla (Big ym. 2016), jolla kuvataan rakennuksen lämpökapasiteetin suhdetta rakennuksen ominaislämpöhäviöön yhtälön 1 mukaan.

$$\tau = \frac{C_s}{G_T} \quad (1)$$

τ on rakennuksen aikavakio, s

C_s on rakenteiden, kalusteiden ja ilman lämpökapasiteetti, J/°C

G_T on tilan ominaislämpöhäviö tai kokonaiskonduktanssi, W/°C, joka koostuu sekä rakenteista että ilmanvaihdosta johtuvasta lämpöhäviöstä.

(Sandberg 2014: 422–3.)

Mikäli oletetaan, että rakennuksen eristeiden sisäpuolinen terminen massa kuten rakenteet, kalusteet ja ilma pysyvät samassa ajasta riippuvaisessa lämpötilassa, rakennuksen tai tilan jäähtyminen voidaan kuvata niin kutsutun yhden aikavakion mallilla (Sandberg 2014: 422–3). Tällöin voidaan käsin laskemalla karkeasti arvioida kuormanpudotuksen vaikutusta tilan sisälämpötilaan (tai jäähtymiseen) esimerkiksi Big ym. (2016) esittämän kokeellisen laskentamenetelmän avulla, jossa sovelletaan aikavakiota yhtälössä 2.

$$T_i = (T_s - T_0)X + T_0 + (T_s - T_sX + T_0X - T_0)e^{(-t/\tau)} \quad (2)$$

T_i on sisälämpötila välittömästi kysyntäjoustotapahtuman päättymisen jälkeen, °C

T_s on sisälämpötila kysyntäjoustotapahtuman alussa, °C

T_0 on ulkolämpötila, °C

t on joustettava aika, h

τ on aikavakio, h

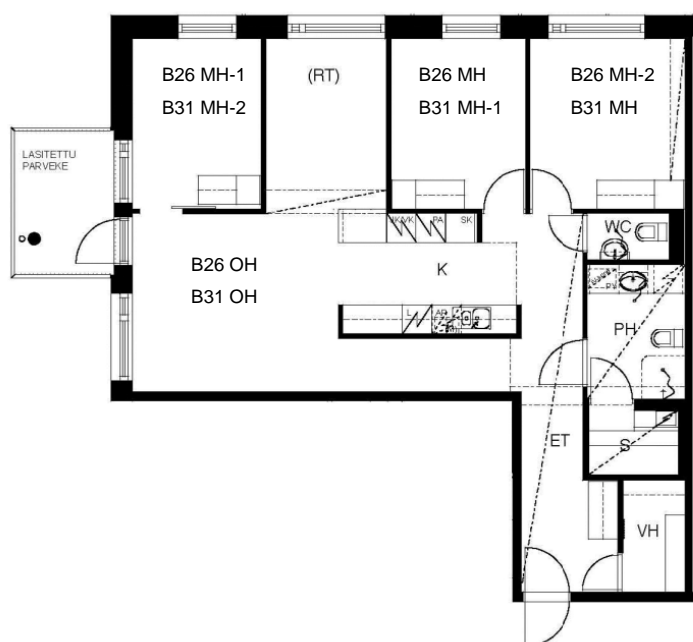
$X = q/q_0$, jossa q on toimitettu lämmitysteho kysyntäjoustotapahtuman aikana, ja q_0 on tarvittava lämmitysteho alkuperäisessä lämpötilaerossa $T_s - T_0$.

Tämä on kuten mainittu karkea tai yksinkertaistettu laskentamenetelmä eikä se ilman laajentamista huomioi muun muassa sisäisten ja ulkoisten lämpökuormien sekä ulkolämpötilan vaihteluita kysyntäjoustotapahtuman aikana. Laskennassa käytettävää aikavakiota voidaan muun muassa selvittää rakennussimuloinnin avulla monivyöhykemallia hyödyntämällä, jossa huomioidaan rakennuksen väliseinien ja sisäisten kantavien rakenteiden lämpökapasiteetin vaikutusta rakennuksen jäähtymiseen tai aikavakioon (Big ym. 2016). Tällöin aikavakiolle ei kuitenkaan tämän tutkimuksen osalta vaikuta enää lukuna olevan tarvetta, sillä kuormanpudotuksen vaikutuksia voidaan tutkia huomattavasti monipuolisemmin suoraan rakennussimulointiohjelmassa, mihin myös keskitytään työn seuraavissa luvuissa. Yksinkertaisempi laskentamenetelmä voi kuitenkin olla hyödyllinen esimerkiksi alustavien arviointien tekemiseen ennen rakennuksen raskaampaa energiamallinnusprosessia ja lisäksi aikavakiota on myös hyödynnetty lämmitystarpeen

ennustamisessa oppivissa säätöjärjestelmissä (Omar & Bushby 2015) sekä kaukolämpöverkon järjestelmätasolla kysyntäjoustopotentiaalin arvioimisessa kysyntäjoustopotentialin arvioimisessa kysyntäjoustopotentialin simuloiduissa huutokauppamenettelyssä (Wernstedt ym. 2008).

4.2 Tutkimuskohde ja tutkittavat kysyntäjoustostrategiat

Tutkimuksen kohteena toimii Helsingissä sijaitsevan asunto-osakeyhtiön asunnot B26 ja B31. Asunto-osakeyhtiö koostuu kahdesta vuonna 2009 valmistuneesta rakennuksesta, joista tarkasteltavat asunnot sijaitsevat samassa rakennuksessa päällekkäin kerroksissa 3 ja 4 ja koostuvat kuvan 33 mukaisista tiloista.



Kuva 33. Tutkittavien asuntojen (B26 ja B31) mallipohja (pohjassa on esitetty energiamallissa käytetyt nimikkeet).

Kysyntäjoustopotentialia tutkittiin rakennussimulointiohjelmistoa hyödyntäen kahdella yleisellä kysyntäjoustostrategialla sekä lämmityksen huipputehon rajoitusohjelmalla lämpimän käyttöveden kulutushuipun aikaan seuraavassa järjestyksessä.

- Case 1: Tuotantoon kohdistuva ohjaus
Laaditussa ja tutkitussa kysyntäjoustostrategiassa lämmitysverkoston menoveden lämpötilan perusasetusarvoa poikkeutetaan alaspäin, mikä tarkoittaa käytännössä sitä, että lämmitysverkoston tehoa rajoitetaan.

- Case 2: Vyöhykkeisiin kohdistuva ohjaus
Laaditussa ja tutkitussa kysyntäjoustostrategiassa vyöhykkeiden sisälämpötilan perusasetusarvoja poikkeutetaan alaspäin, mikä tarkoittaa käytännössä sitä, että lämmitystehon kysyntää vähennetään.
- Case 3: Huipputehon rajoitus
Laaditussa ja tutkitussa strategiassa rakennuksen huipputehoa pyritään pysyvästi rajoittamaan energiakustannusten leikkaamiseksi, hyödyntämällä edellisen tapauksen menetelmiä. On tärkeä huomioda, että tämän menetelmän kohdalla ei ole käytetty nimikettä kysyntäjoustostrategia, sillä optimoinnin tarkastelualueena on rakennuksen energiajärjestelmä eikä koko energian toimitusketju.

Ilmanvaihdon kysyntäjoustoa ei otettu tarkasteluun mukaan, sillä tarkasteltava rakennus on varustettu asuntokohtaisilla ilmanvaihtokoneilla, joissa tuloilmaa lämmitetään sähköpattereilla.

Seuraavissa kappaleissa käydään lyhyesti läpi mallinnusprosessin kulkua, käytettyjä lähtötietoja ja tutkimuksen aikana tehtyjä olettamuksia. Energiamallinnuksen lähtökohtana oli alun perin mahdollisimman todenmukaisen mallin luominen, jotta se olisi vertailtavissa mittaustulosten kanssa mutta koska tätä osa-aluetta ei työn aikana toteutettu, keskittyy tutkimus eri kysyntäjoustostrategioihin liittyvien ilmiöiden tutkimiseen, esimerkiksi sisäolosuhteiden ja taloteknisten järjestelmien osalta.

4.3 Menetelmät ja mallinnusprosessi

Rakennuksen energiamallinnus toteutettiin osittain SRV Rakennus Oy:n kautta saatujen arkkitehti-, rakenne-, ilmanvaihto- ja sähkösuunnitelmien perustueella. Kaikkia teknisiä tietoja ei ollut kuitenkaan käytettävissä, joten mallinnuksessa turvauduttiin myös alalla yleisesti käytettyihin ratkaisuihin ja taulukkoarvoihin. Mallinnuksessa käytetyt piirustukset ja niiden käyttö sekä muut laskentatekniset lähtötiedot on esitetty tarkemmin liitteessä 2.

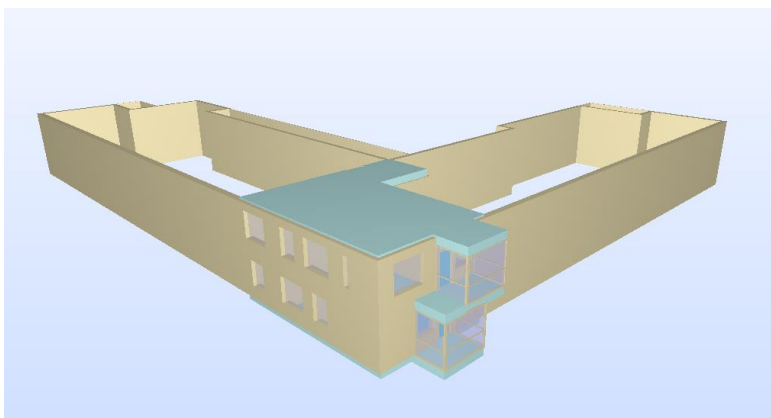
4.3.1 Mallinnusympäristö

Energiamallinnuksen ja kysyntäjoustostrategioiden simulointiympäristönä käytettiin ohjelmistoa IDA Indoor Climate and Energy versiota 4.8, jolle käytetään tästä eteenpäin lyhennettä IDA ICE. IDA ICE on dynaaminen rakennussimulointiohjelmisto, jolla on mahdollista mallintaa ja simuloida kokonaisia rakennuksia tai alueita taloteknisine järjestelmineen ja tarvittavine ohjaus- ja säätöjärjestelmineen. Ohjelmisto on usean eri yrityksen

ja tutkimuslaitoksen hyödyntämä rakennussimulointiohjelmisto ja tutkimusmenetelmä ja sen tulokset on validoitu monen tunnetun yhdistyksen (ASHRAE, IEA, CEN jne.) toimesta vertailemalla simuloituja tuloksia mitattuun dataan sekä muihin ohjelmistoihin. (IDA Indoor Climate and Energy 2018.) Kaikki laskentaan vaikuttavat tekijät mallinnettiin IDA ICE-ohjelmistolla lukuun ottamatta asuntojen ja 3– 4. kerrosten ulkoista geometriaa, joka luotiin erillisessä ohjelmistossa.

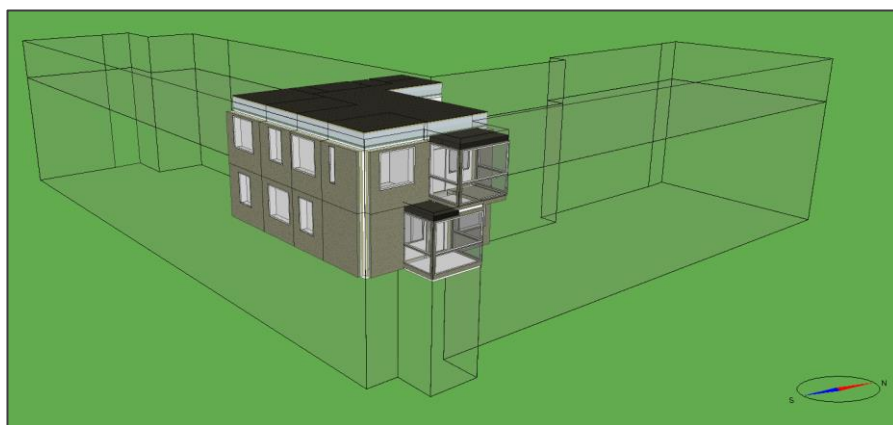
4.3.2 Rakennuksen sijainti, geometria ja sisäiset vyöhykkeet

Rakennuksen ilmansuunta sekä kerroskorkeudet, ulkoseinät ja asuntojen tilajako mallinnettiin arkkitehtipiirustusten mukaan MagiCAD Room -ohjelmistolla, joka on AutoCAD-ohjelmiston laajennus rakennusten tietomallintamiseen ja lämpöhäviölaskelmien laatimiseen. Arkkitehdin pohjapiirustukset tuotiin ohjelmaan viitetiedostoina, jonka perusteella asuntojen tilajaot sekä sisä- ja ulkoseinät mallinnettiin seinäpaksuuksia myöten. Lisäksi tutkittavien asuntokerrosten ulkoseinät mallinnettiin kokonaisuutena siten, että niitä myöhemmin toistamalla voitiin luoda koko rakennusvaipan karkea geometriamalli IDA ICE-ohjelmistossa. Asuntojen tilavyöhykkeet nimettiin arkkitehtipiirustuksen mukaisesti ja kerroskorkeudet määritettiin julkisivuleikkauksen perusteella. Ohjelmistosta riippumattomaa tarkastelua varten valmis geometria käännettiin lopuksi ifc-tiedostomuotoon (kuva 34). Tuloksena saatiin yksinkertainen geometriamalli tutkittavista asunnoista valmiiksi määritetyillä tilavyöhykkeillä sekä tutkittavien asuntojen kerrosten karkea ulkoinen geometria.



Kuva 34. Asuntojen ja asuntokerrosten geometria ifc-tiedostomuodossa Solibri Model Checker tarkasteluohjelmistossa.

MagiCAD Room -mallinnuksen jälkeen malli tuotiin IDA ICE -ohjelmistoon ifc-tiedostona, jossa rakennuksen lopullinen ulkoinen geometria määritettiin rakennuksen 3–4. kerroksia toistamalla (kuva 35). Tämän arvioitiin olevan riittävä tarkkuus, sillä tarkastelun alaisena olivat ainoastaan asunnot B26 ja B31 – tosin mallinnettu ulkovaippa mahdollistaa myös muiden asuntojen lisäämisen jälkeensä. Tutkittavien asuntojen tilavyöhykkeiden geometria luotiin automaattisesti ifc-tiedoston tilavyöhykkeiden perusteella. Sääties-toksi määritettiin Helsingin testivuosi 2012 versio (TRY2012), joka perustuu Ilmatieteen laitoksen energialaskennalle laadittuihin sääties-toihin (Energialaskennan testivuodet nykyilmastossa 2012).



Kuva 35. Lopullinen energiamalli täydennettynä IDA ICE -ohjelmistossa siten, että rakennus seuraa 3–4. kerroksen ulkovaipan muotoa kauttaaltaan.

4.3.3 Rakennusvaippa

Rakennuksen ulko- ja sisäseinien rakenteet mallinnettiin rakennesuunnitelmien rakenneleikkausten perusteella. Rakenteet määritettiin tarkastelemalla leikkauksien rakennusmateriaalikuvauksia ja valitsemalla niistä lähimmän vastaavan materiaalin IDA ICE -ohjelmiston rakennekirjasosta, jonka materiaalit perustuvat rakentamismääräysten ohjeeseen (C4 Suomen rakentamismääräyskokoelma. Lämmöneristys. Ohjeet 2012). Tällä menetelmällä saavutettiin useimmissa tapauksissa rakenneleikkauksissa ilmoitettu rakenteen lämmönläpäisykerrointa vastaava arvo (U -arvo tai W/m^2K) mutta poikkeustapauksissa rakenneaineiden lämmönjohtavuutta muokattiin hieman vastaavan kertoimen saavuttamiseksi. Tarkasteluasuntojen viereisissä asunnoissa oletettiin olevan samankaltaiset olosuhteet kuin tarkastelualueella, joten lämmönsiirtymistä asuntojen välillä ei otettu huomioon.

Ikkunoiden ja ulko-ovien tietoja ei ollut käytettävissä, joten näiden mallinnuksessa käytettiin rakentamismääräysten määrittämiä U-arvoja ja ikkunoiden auringonsuojausominaisuuksia rakennusvuoden perusteella (Ympäristöministeriön asetus rakennuksen energiatodistuksesta 176/2013. Liite 1. Energiatodistuksen kokonaisenergiankulutuksen (E-luvun) määrittäminen). Lisäksi rakenteiden välisten liitosten kylmäsiltojen lämpöhäviöt määritettiin rakentamismääräyskokoelman osan D5 2012 kohdan 3 esitettyjen taulukkoarvojen mukaan. Parvekelasit olivat tarkastelujaksolla kiinni (talvi).

Rakennusvaipan ilmantiiveydeksi määritettiin $4,0 \text{ m}^3/(\text{h m}^2)$ 50 Pa:n paine-erolla ja teoreettinen vuotoilma simuloitiin IDA ICE:n keskinkertaisella tuuliprofiililla.

4.3.4 Sisäilmaston tavoitearvot

Asuntojen sisälämpötilan asetusarvoksi määritettiin kaikkiin tiloihin $21,5 \text{ }^\circ\text{C}$. Kysyntäjoustopahtumien sisälämpötilan pysyvyyden tavoitteiksi asetettiin $\pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ ja ehdottomaksi alaraja-arvoksi määritettiin $20 \text{ }^\circ\text{C}$, jonka alle minkään vyöhykkeen sisälämpötila ei saanut tapahtuman ollessa käynnissä pudota. Muita kuin lämpötilan tavoite- ja raja-arvoja ei otettu simuloinneissa huomioon.

4.3.5 Talotekniset järjestelmät ja sisäiset lämpökuormat

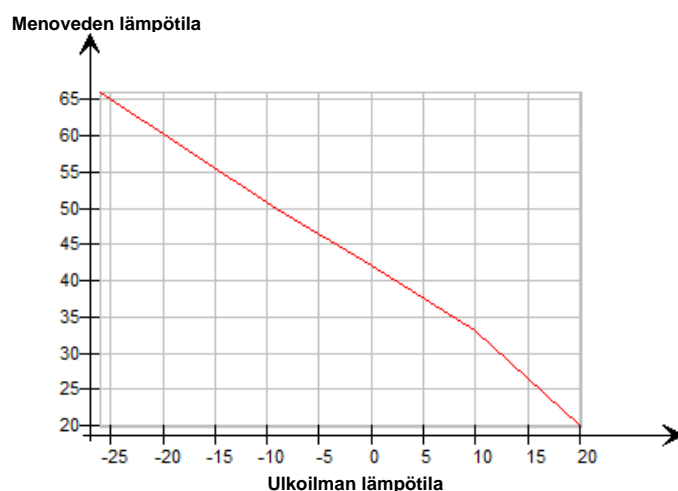
Rakennuksen lämmityssuunnitelmia ei ollut tutkimuksen aikana käytettävissä mutta SRV Rakennus Oy:ltä saatujen lähtötietojen mukaan rakennuksen lämmitysmenetelmänä toimii kaukolämpö ja lämmönluovutusmenetelmänä vesikiertoiset radiaattorit. Kosteissa tiloissa toimii sähkösuunnitelmien mukaisesti sähkökäyttöinen mukavuuslattialämmitys.

Koska lämmityssuunnitelmia ei ollut käytettävissä, asuntojen radiaattorit mitoitettiin rakennussimulointiohjelmistolla siten, että mitoitussulkolämpötilassa ($-26 \text{ }^\circ\text{C}$) ja lämmitysverkoston menolämpötilan maksimilämpötilassa ($+66 \text{ }^\circ\text{C}$) asuntojen sisälämpötila pysyi $21 \text{ }^\circ\text{C}$:ssa, huomioiden myös tilan ilmanvaihdon tarvitsema lämmitysteho. Tällä menetelmällä oletettiin, että rakennuksen lämmitysjärjestelmät eivät ole yli- tai alimitoitettuja eikä mallinnetut radiaattorit täten välttämättä vastaa rakennukseen asennettuja radiaattoreita täysin.

Lämmitystehon mitoituskaskelmien perusteella lämmitystuotannon kokonaisteho ja lämmitysverkoston massavirtaus (kg/s) rajoitettiin asuntojen huipputehotarpeen perusteella.

Tämä tarkoittaa esimerkiksi sitä, että tuotannon kysyntäjoustotilanteessa lämmitysverkoston kiertovesipumppu ei pysty kompensoimaan menetettyä tehoa kuin mitoitusmasavirtaamaan asti – aivan kuten todellisessakin tilanteessa, jossa pumpun teho on rajallinen.

Mallinnettu lämmitysverkoston säätökäyrä (kuva 36) vastaa rakennuksen todelliseen lämmönjakokeskuksen säätimelle asetettua säätökäyrää, jossa korkein menoveden lämpötila on 66 °C. Rakennuksen teknisten asiakirjojen perusteella lämmitysverkoston mitoituslämpötilat ovat kuitenkin 70/40 °C. Laskentateknisesti tämän tiedon käyttäminen pelkästään radiaattoreiden mallinnuksessa johtaisi kuitenkin tässä tapauksessa rakennukseen asetettuun säätökäyrään nähden (jossa korkein lämpötila on +66 °C) alimitoitettuihin radiaattoreihin, sillä radiaattorin keskilämpötila olisi tällöin mitoitusilannetta alempi.



Kuva 36. Kohteen radiaattoriverkoston menolämpötilan todellinen säätökäyrä (kuvankaappaus säätökäyrän mallinnuksesta IDA ICE -ohjelmistossa).

Sähkökäyttöisten mukavuuslattialämmitysten tehot määritettiin sähkösuunnitelmien mukaan ja säätöperusteeksi ilman lämpötila. Kysyntäjoustostrategioita ei sähkökäyttöisten lattialämmitysten kohdalla mallinnettu mutta on kuitenkin huomioitava, että järjestelmät vaikuttavat hieman asunnon sisälämpötiloihin kysyntäjoustotapahtuman aikaan, kun muiden tilojen lämpötilat alkavat laskemaan. Tämä vaikutus oletettiin kuitenkin olevan marginaalinen lyhyellä aikavälillä.

Lämpimän käyttöveden kulutus määritettiin rakentamismääräysten ohjearvojen mukaisesti (Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen energiatehokkuudesta 1010/2017 12 §), sillä myöskään käyttöveden kulutustietoja ei ollut mallinnuksen aikana

käytettävissä. Lämpimän käyttöveden yhden vuorokauden kulutusprofiili määritettiin standardin SFS-EN 15316-3-1:2007 mukaan mutta kuukausivaihtelua ei mallinnettu.

Asuntojen sisäisten lämpökuormat, kuten ihmiset, valaistus ja laitteet, määritettiin FIN-VAC ry:n laatiman tutkimusraportin (Ehdotus lähes nollaenergiarakentamisen laskennan lähtötiedoiksi 2014) ja sen yhteydessä julkaistun käyttöprofiilitaulukon perusteella.

Asuntojen ilmanvaihtojärjestelmät ja huoneiden ilmavirrat määritettiin ilmanvaihtosuunnitelmien pohjapiirustusten perusteella. Ilmanvaihtokoneiden mitoitusilanteen suoritusarvoja ei ollut käytettävissä, joten koneiden tekniset suoritusarvot arvioitiin konemallin teknisten esitteen sekä rakennusvuoden voimassa olevien rakentamismääräysten perusteella.

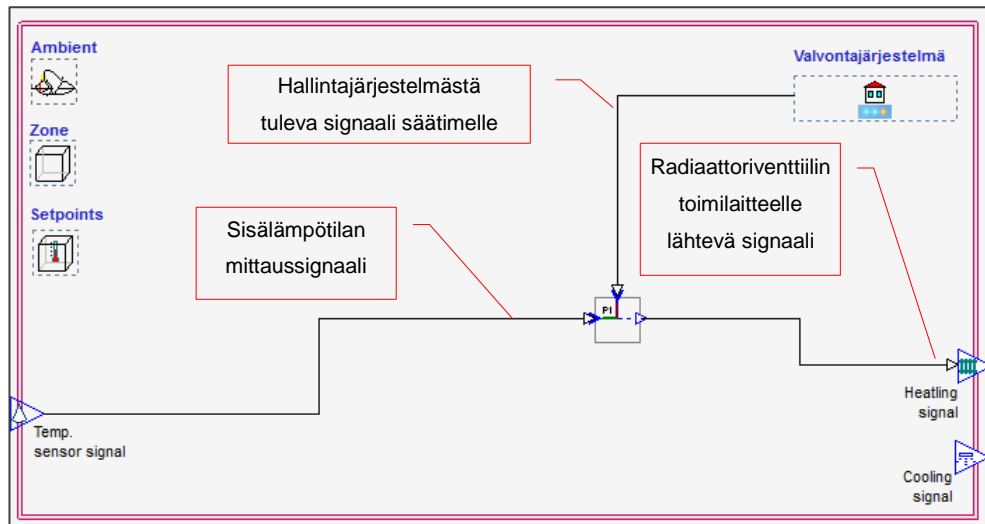
4.3.6 Ohjaus- ja säätöjärjestelmät

IDA ICE -ohjelmisto sisältää jo joitain valmiita tavanomaisia taloteknisiä järjestelmiä ohjaus- ja säätöjärjestelmineen mutta ohjelmisto mahdollistaa myös mukautettujen järjestelmien mallintamisen monipuolisesti. Hierarkkisesti tarkasteltuna nämä järjestelmät ovat jaettu kolmeen tasoon, jotka ovat karkeasti valvontataso (supervisory control), vyöhyketaso (zone control) ja laitetaso (device control). Kysyntäjoustoprofiilille ei kuitenkaan löydy valmiita järjestelmiä, ja tässä tutkimuksessa ohjaus- ja säätöjärjestelmät mallinnettiin pääsääntöisesti IDA ICE -ohjelmiston valvonta- ja laitetasojä hyödyntäen.

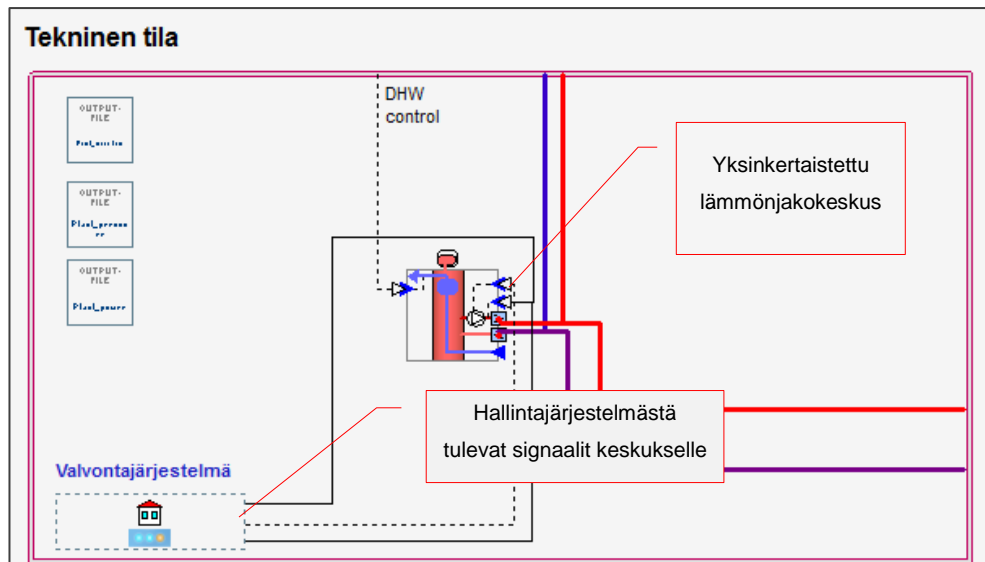
Valittujen kysyntäjoustoprofiilien simuloimiseksi mallinnettiin kolme mukautettua ohjaus- ja säätöjärjestelmää:

- vyöhykekohtainen sisälämpötilan säädin ulkoisella asetusarvon signaalilla (kuva 37)
- lämmityskeskuksen menoveden lämpötilan säädin ulkoisella asetusarvon signaalilla (kuva 38) ja
- kysyntäjoustoprofiilien hallintajärjestelmä (kuva 39).

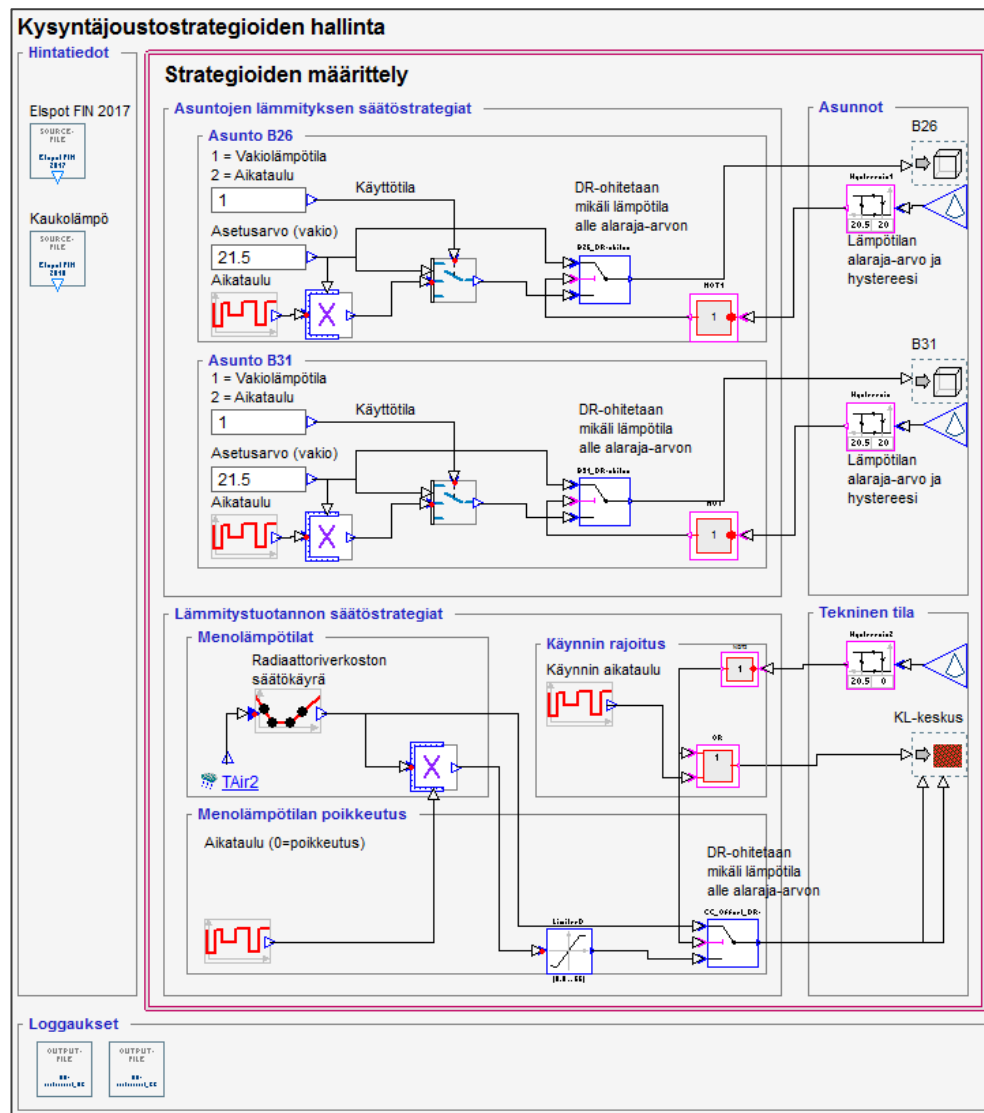
Ensimmäiset kaksi järjestelmää toimivat varsinaisen lämpötilasäädön toteuttajana, kun hallintajärjestelmässä määritetään haluttu kysyntäjoustoprofiili ja toteutuksen ehdot, kuten pienin sallittu sisälämpötila. Mallinnetut järjestelmät hyödyntävä niin kutsuttua PI-säädintä.



Kuva 37. Yksi versio mallinnetusta vyöhykkeen lämmityslaitteen lämpötilasäätimestä graafisesti esitettynä IDA ICE -ohjelmistossa (Ohjaintaso: Device control).



Kuva 38. Yksi versio mallinnetusta yksinkertaistetusta lämmityksen tuotantolaitoksesta graafisesti esitettynä IDA ICE -ohjelmistossa (Ohjaintaso: Device control).



Kuva 39. Yksi versio mallinnettujen kysyntäjoustostrategioiden hallintajärjestelmästä graafisesti esitettynä IDA ICE -ohjelmistossa (Ohjaintaso: Supervisory control).

Kysyntäjoustostrategioiden käynnistäminen ja eri asetusarvojen poikkeuttaminen toteutettiin yksinkertaisella menetelmällä, jossa yksi signaali toimi samanaikaisesti sekä kysyntäjoustosignaalinä että asetusarvon korjauskertoimena. Tavanomaisessa tapauksessa signaalin amplitudi oli jatkuvasti 1 ($y = 1$) ja poikkeuttamistapauksissa signaalin amplitudi oli joko suurempi kuin 1 ($y > 1$), esilämmitystilanteen simuloimiseksi tai pienempi kuin 1 ($y < 1$), kysyntäjoustotilanteen simuloimiseksi. Esimerkiksi sisälämpötilan asetusarvon ollessa 21 °C ja kysyntäjoustosignaalin amplitudin ollessa 0 ($y = 0$) sisälämpötilan asetusarvoksi määräytyi 0 °C ($21 \times 0 = 0$). Tämän menetelmä todettiin olevan riittävä kysyntäjoustostrategioiden peruseriaatteiden tutkimiseksi rakennussimulointiympäristössä.

Mallinnettu hallintajärjestelmä mahdollistaa myös pienin mukautuksin kysyntäjouston simuloimisen energian hintatiedoston avulla, missä käynnistetään ennalta määritetty ja optimoitu kysyntäjoustostrategia hinnan noustaessa yli määritetyn arvon. Tällöin voidaan esimerkiksi selvittää kokonaisen rakennuksen tai alueen vuoden kysyntäjoustopotentiali energiakustannusten näkökulmasta. Tämän tutkimuksen yhteydessä kaukolämmön realistista hintatiedostoa ei ollut kuitenkaan käytettävissä.

4.4 Simuloinnin toteuttaminen, kulku ja tulokset

Kysyntäjoustostrategioiden tarkastelujaksoksi otettiin yhden vuoden energiasimuloinnista valikoitu vuorokausi (24 h), jossa asuntojen yhteenlaskettu tehontarve on suurimmillaan. Tämän perusteella tarkastelujaksoksi valikoitui 12.1.2018. Simuloinnit suoritettiin enintään tunnin aika-askeleella ja tasapainotilanteen (eng. Steady state) saavuttamiseksi mallia simuloitiin ensin 14 vuorokautta vastaavan ajan ennen jokaisen varsinaisen simulointitapauksen käynnistämistä. IDA ICE -ohjelmiston mukaan käynnistysvaiheen pituus riippuu rakennuksen massiivisuudesta (lämpökapasiteetista) sekä siitä, onko rakennus kosketuksissa maaperään. Yleisimmille rakennuksille riittää kuitenkin kahden viikon tai 14 vuorokautta vastaava aika. Tässä onkin hyvä huomata, että tutkittavia kysyntäjoustostrategioita ei erikseen ajoitettu yhdelle vuorokaudelle toteutettavaksi, vaan ne olivat myös osa simuloinnin käynnistysvaihetta.

Tarkasteltujen kysyntäjoustostrategioiden eri variaatioita ei määritetty etukäteen vaan strategioiden toimivimmat variaatiot haettiin manuaalisesti käytännössä seuraavien muuttujien kautta:

- kysyntäjoustopahtuman voimassaoloaika (ei sisällä esilämmitysjaksoa eikä palautumisjaksoa)
- kysyntäjoustopahtumaa edeltävä mahdollinen esilämmitysjakso
- kysyntäjoustopahtumaa seuraava mahdollinen palautumisjakso (jyrkkä tai loiva palautuminen)
- perusasetusarvon poikkeuttamisaste.

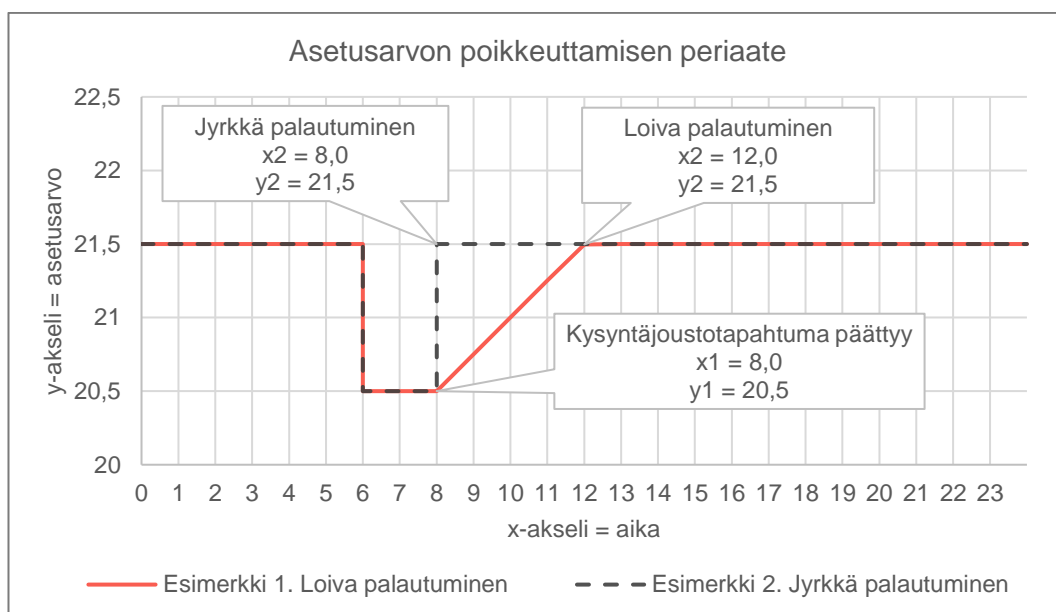
Tämä tutkimuksen osalta asetuservojen jyrkällä tai loivalla palautumisella viitataan ajankohtaan, jolloin asetuservot palautuvat perusasetusarvoihinsa kysyntäjoustopahtuman päättymisestä. Tämä voi tapahtua välittömästi kysyntäjoustopahtuman päättyessä tai esimerkiksi kahden tunnin kuluttua loivasti siten, että kysyntäjouston päättymisajan ja

perusasetusarvon välille muodostuu lineaarinen suora tai periaatteessa säätökäyrä asetusravolle (kuva 40). Tämä suora voidaan myös kuvata kulmakertoimella k kaksiulotteisessa xy -koordinaatistossa, jossa x kuvaa aikaa ja y kuvaa asetusravoa seuraavasti:

$$k = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \quad (3)$$

x_1 on ajankohta, jolloin kysyntäjoustotapahtuma päättyy
 x_2 on ajankohta, jolloin asetusravot ovat palautuneet perusasetusravoonsa
 y_1 on asetusrav, kun kysyntäjoustotapahtuma päättyy
 y_2 on perusasetusrav.

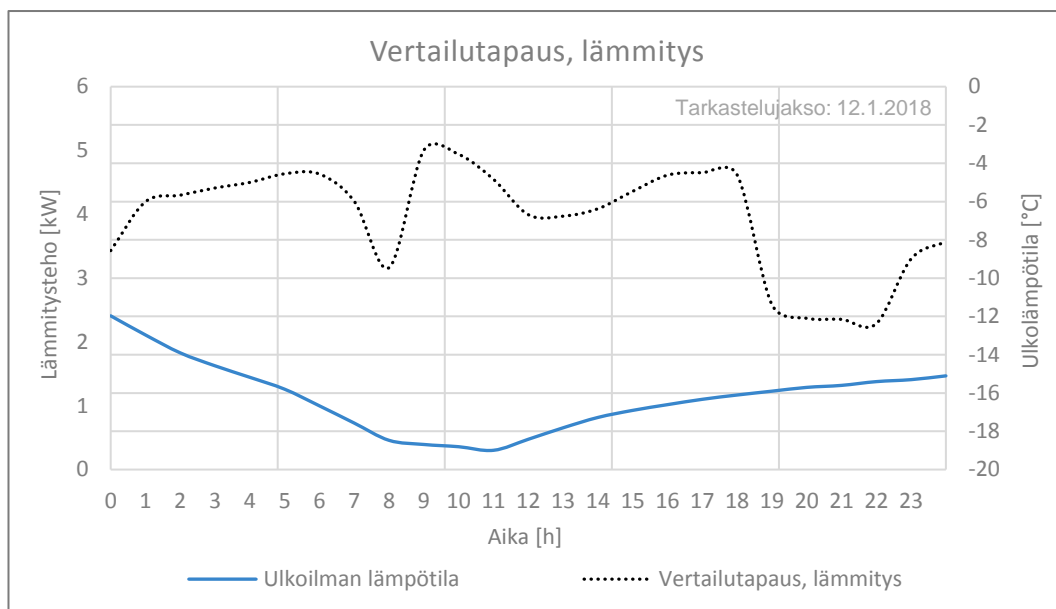
Simulointiohjelmassa tämä toteutettiin käytännössä määrittämällä ajankohta, jolloin asetusravot ovat täysin palautuneet perusasetusravoihinsa kysyntäjoustotapahtuman päättymisestä, minkä myötä näiden pisteiden välille muodostui lineaarinen suora kuvan 40 mukaisesti.



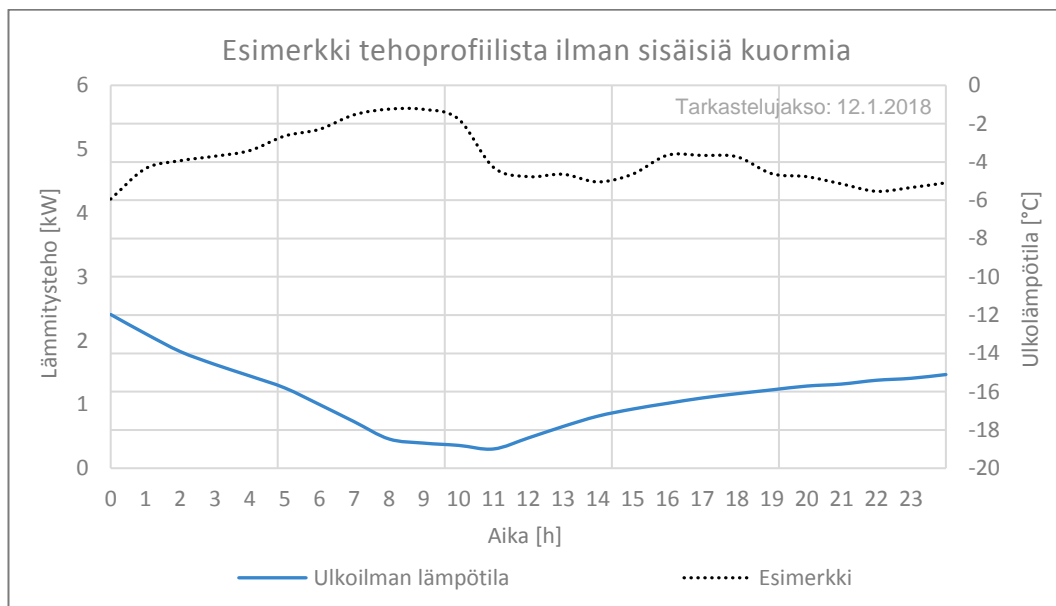
Kuva 40. Asetusravon poikkeuttamisen periaate. Tässä kuvassa perusasetusrav 21,5 °C poikkeutetaan -1 °C klo 6.00–8.00 ja se palautuu kysyntäjoustotapahtuman päättymisen jälkeen (klo 8.00) esimerkin 1. mukaan loivasti, jolloin kulmakerroin on 0,25, ja esimerkin 2. mukaan jyrkästi tai tässä tapauksessa välittömästi, jolloin kulmakerroin on periaatteessa ääretön, sillä viivan suunta on tällöin suoraan ylöspäin.

Kuvassa 41 on esitetty tutkimuksen vertailutapauksena käytetty simuloitu lämmityksen yhteenlaskettu tehoprofiili tarkasteltaville asunnoille, jonka selkeät vaihtelut voidaan pääosin selittää asuntojen sisäisillä lämpökuormilla. Esimerkiksi aamulla lämmitystehon tarve on pienempi, kun ihmiset (mallinnetun käyttöprofiilin mukaisesti) heräävät ja siirty-

vät makuuhuoneista olohuoneeseen ja keittiöön, ja laittavat valaistuksen päälle, käyttävät sähkölaitteita ja valmistelevat ruokaa. Vastaava muutos lämmitystehontarpeessa on nähtävissä myös illalla mutta pidemmällä ajanjaksolla. Havainnoinnin vuoksi kuvassa 42 on lisäksi esitetty asuntojen lämmityksen tehoprofiili ilman sisäisiä kuormia (eli ilman ihmisiä, valaistusta ja sähkölaitteita).



Kuva 41. Tarkastelujakson lämmityksen simuloitu tehoprofiili (asuntojen B26 ja B31 yhteenlaskettu teho), joka toimii tutkimuksen **vertailutapauksena**.



Kuva 42. Tarkastelujakson lämmityksen simuloitu tehoprofiili, mikäli tarkasteltavissa asunnoissa ei olisi sisäisiä lämpökuormia lainkaan (eli ilman ihmisiä, valaistusta ja sähkölaitteita).

Työn seuraavissa alaluvuissa tarkastellaan simuloinneista saatuja tuloksia ja verrataan niitä yllä esitettyyn (kuva 41) vertailutapaukseen. Tarkasteltavat kysyntäjoustostrategiat käsittävät siis

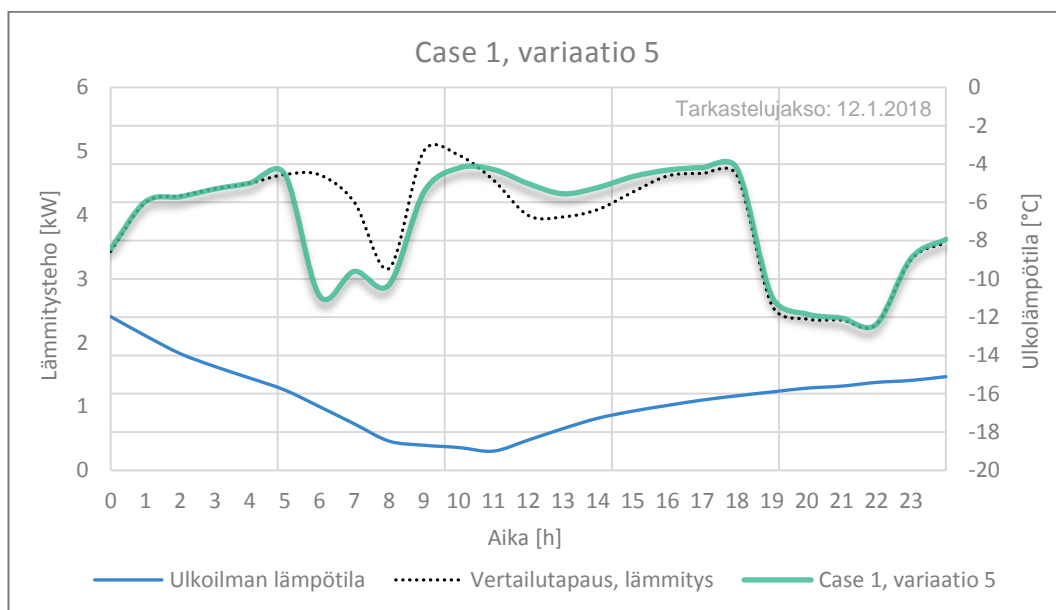
- tuotantoon kohdistuvaa ohjausta
- vyöhykkeisiin kohdistuvaa ohjausta
- huipputehon rajoitusohjelmaa.

4.4.1 Case 1: Tuotantoon kohdistuva ohjaus

Tutkittava strategia: Kysyntäjousto lämmitysverkoston menolämpötilan asetusarvon poikkeuttamisella.

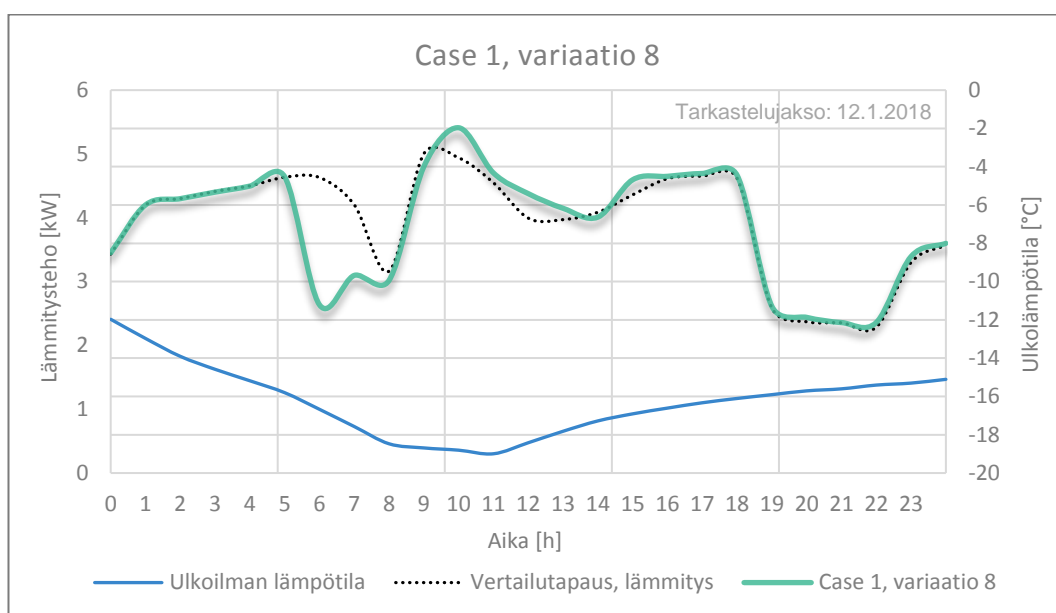
Kuvassa 43 on esitetty yksi esimerkki (Case 1, variaatio 5) strategian onnistuneesta toteuttamisesta. Tässä variaatiossa lämmitysverkoston menoveden lämpötilan säätökäyrää on poikkeutettu -25 % klo 6.00–8.00 ja lisäksi kysyntäjoustotapahtumasta on palautettu loivasti (kulmakerroin 3,64) siten, että säätökäyrä on palautunut perusasetusarvoonsa klo 12.00:een mennessä lineaarisesti tapahtuman päättymisestä. Tällä variaatiolla hetkellistä lämmitystehontarvetta on leikattu noin -41 % ja koko tarkastelujakson lämmityksen huipputehontarvetta vastaavasti noin -5 %. Hetkellisellä lämmitystehontar-

peella viitataan tämän tutkimuksen yhteydessä kysyntäjoustopotilaan aikaan vallitsevaan tehontarpeeseen ja tarkastelujakson lämmityksen huipputehontarpeella viitataan koko vuorokauden aikana esiintyvään huipputehontarpeeseen.



Kuva 43. Case 1, variaatio 5: Kysyntäjoustopotilahtuma voimassa klo 6.00–8.00, menolämpötila -25 %, palautuminen perusasetusarvoon loivasti (kulmakerroin 3,64) klo 12.00:een mennessä tapahtuman päättymisestä.

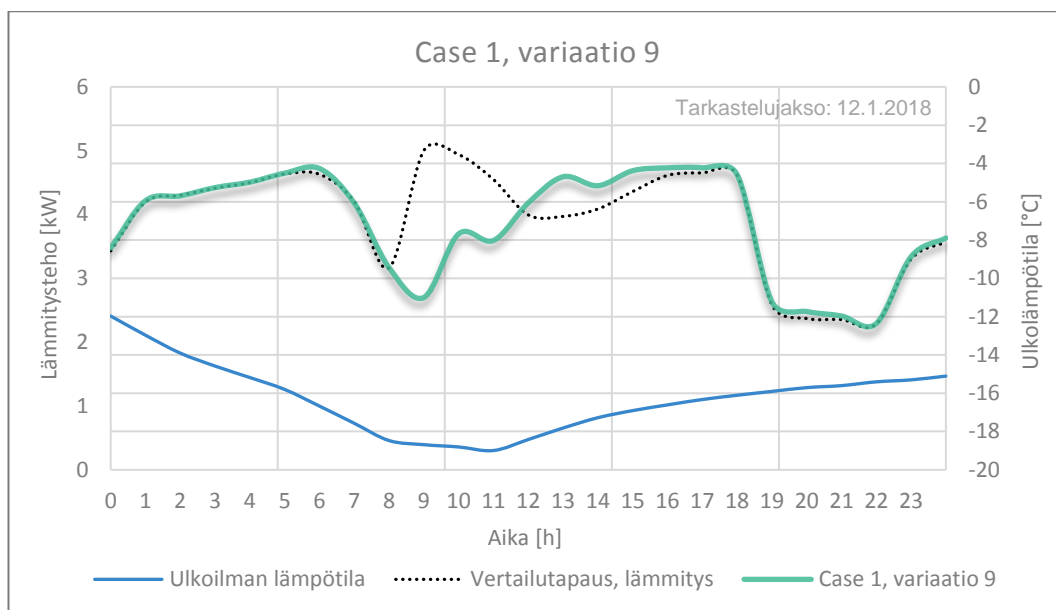
Kuvassa 44 on esitetty edellistä variaatiota vastaava tapaus (Case 1, variaatio 8) mutta tässä tapauksessa kysyntäjoustotapahtumasta on palaututtu jyrkemmin (kulmakerroin 7,64) siten, että lämmitysverkoston menoveden säätökäyrä on palautunut perusasetusarvoonsa kaksi tuntia aikaisemmin, eli klo 10.00. Tästä on seurannut kysyntäjoustotapahtuman aiheuttama jälkipiikki ja noin +8 % nousu tarkastelujakson lämmityksen huipputehontarpeessa. Toisaalta vastaava tilanne (Case 1, variaatio 6), jossa perusasetusarvoon on palaututtu välittömästi (kulmakerroin ∞) kysyntäjoustotapahtuman jälkeen, on saavutettu melkein yhtä suuri hetkellinen tehonleikkaus, noin -41 %, ja vain noin +3 % nousu tarkastelujakson lämmityksen huipputehontarpeessa.



Kuva 44. Case 1, variaatio 8: Kysyntäjoustotapahtuma voimassa klo 6.00–8.00, menolämpötila -25 %, palautuminen perusasetusarvoon loivasti (kulmakerroin 7,64) klo 10.00:een mennessä tapahtuman päättymisestä.

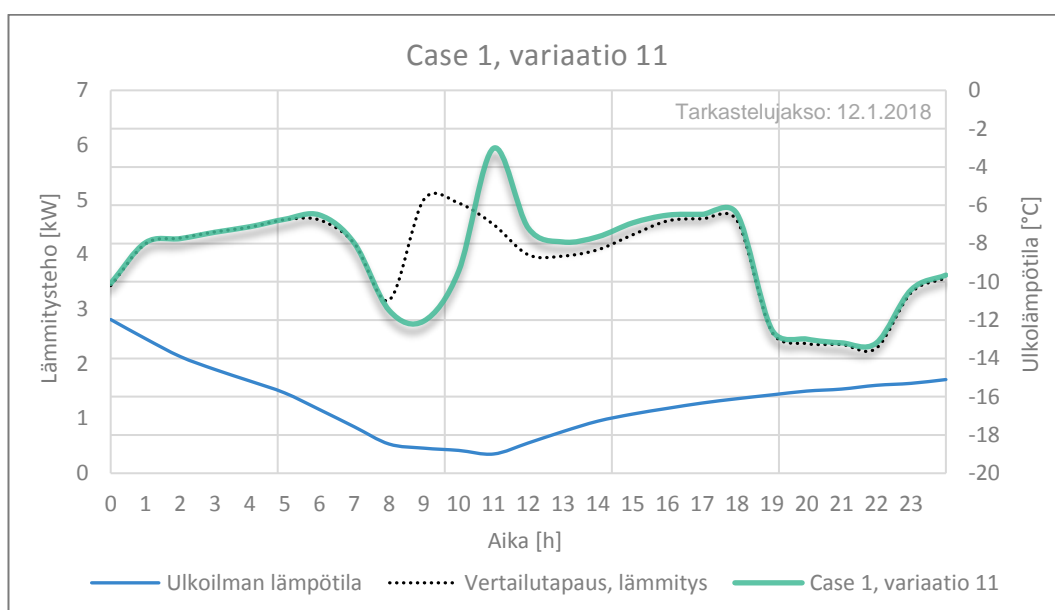
Suurin hetkellinen tehonpudotus saavutettiin kysyntäjoustostrategian variaatolla (Case 1, variaatio 1), jossa hyödynnettiin esilämmitystä. Variaatio vastasi muuten variaatiota 5 mutta ennen kysyntäjoustotapahtuman käynnistämistä lämmitysverkoston menoveden lämpötila nostettiin maksimiarvoon, eli +66 °C:een. Tällöin suurin hetkellisesti saavutettu lämmitystehontarpeen leikkaus oli noin -50 % mutta samalla tarkastelujakson lämmityksen huipputehontarve nousi noin +17 %, joka vastasi esilämmitystilanteen tehontarvetta.

Kuvassa 45 on esitetty toinen esimerkki strategian onnistuneesta toteuttamisesta hie-
man eri ajankohtana (Case 1, variaatio 9). Tässä variaatiossa lämmitysverkoston meno-
veden lämpötilan säätökäyrää on poikkeutettu -25 % klo. 9.00–11.00 ja kysyntäjoustota-
pahtumasta on palaututtu loivasti (kulmakerroin 6,79) siten, että säätökäyrä on palautu-
nut perusasetusarvoonsa klo 13.00:een mennessä lineaarisesti tapahtuman päättymi-
sestä. Tällä variaatiolla hetkellistä lämmitystehontarvetta on leikattu noin -46 % ja koko
tarkastelujakson lämmityksen huipputehontarvetta vastaavasti noin -5 %.



Kuva 45. Case 1, variaatio 9: Kysyntäjoustotapahtuma voimassa klo 9.00–11.00, menolämpötila -25 %, palautuminen perusasetusarvoon loivasti (kulmakerroin 6,79) klo 13.00:een mennessä tapahtuman päättymisestä.

Kuvassa 46 on esitetty edellistä esimerkkiä vastaava variaatio, jossa menoveden lämpötila on palautettu perusasetusarvolle välittömästi (kulmakerroin ∞) kysyntäjoustotapahtuman jälkeen (Case 1, variaatio 11). Tästä on seurannut kysyntäjoustotapahtuman aiheuttama jälkipiikki ja noin +19 % nousu tarkastelujakson lämmityksen huipputehontarpeessa, joka kuvaa jälkipiikin huipputehoa. Toisin sanoen kysyntäjoustotapahtumalla on aiheutettu tapahtumaa edeltävää tilannetta merkittävästi suurempi tehontarve ja sen voidaan täten nähdä olevan epäonnistunut, ellei tarkoituksena ole siirtää kulutushuippua hyväksymällä suuremman tehohuipun myöhemmällä ajankohdalla. Kuvasta nähdään myös, että palautuminen on tapahtunut ulkolämpötilan ollessa pienimmillään, joten ulkolämpötilan trendiä seuraamalla voisi olla mahdollista määrittää sopivampi palautumisaika.



Kuva 46. Case 1, variaatio 11: Kysyntäjoustotapahtuma voimassa klo 9.00–11.00, menolämpötila -25 %, palautuminen perusasetusarvoon välittömästi (kulmakerroin ∞) tapahtuman päättymisen jälkeen.

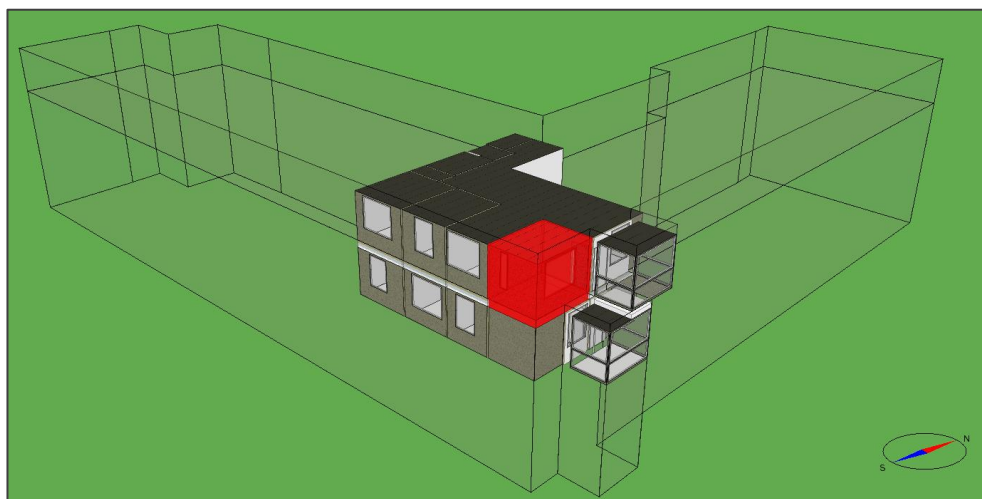
Suurin hetkellinen tehonpudotus, noin -52 %, on edellisen ajankohdan tapaan saavutettu strategian variaatiolla (Case 1, variaatio 10), jossa hyödynnettiin esilämmitystä mutta tässä tapauksessa tarkastelujakson lämmityksen huipputehontarve kasvoi vain noin +3 %.

Taulukossa 3 on esitetty yhteenveto edellä käsitellyistä kysyntäjoustostrategian variaatioiden tuloksista. Lisäksi taulukossa on esitetty muutokset asuntojen energiankulutuksessa, joissa ei havaittu merkittävää muutosta. Mitään johtopäätöksiä kysyntäjoustostrategian vaikutuksesta rakennuksen energiankulutukseen ei tässä yhteydessä kuitenkaan tehdä, sillä kyse on vain yhden vuorokauden tarkastelujaksosta.

Taulukko 3. Case 1: Yhteenveto tehonpudotuksista kysyntäjoustostrategian eri variaatioissa.

Case 1 Yhteenveto strategian variaatioista		Case 1, variaatio 1	Case 1, variaatio 5	Case 1, variaatio 8	Case 1, variaatio 9	Case 1, variaatio 10	Case 1, variaatio 11
Menoveden lämpötilan asetusarvon poikkeutus	%	-25 %	-25 %	-25 %	-25 %	-25 %	-25 %
Esilämmitys	h, ennen	2,0	-	-	-	2,0	-
Kysyntäjoustotapahtuman alku	klo	6.00	6.00	6.00	9.00	9.00	9.00
Kysyntäjoustotapahtuman päättyminen	klo	8.00	8.00	8.00	11.00	11.00	11.00
Asetusarvojen palautuminen perusasetusarvolle	h, jälkeen	5,0	4,0	2,0	2,0	2,0	-
Hetkellinen teho, lämmitys, vertailutapaus	W	4 630	4 630	4 630	5 005	5 005	5 005
Hetkellinen teho, lämmitys, kysyntäjoustotilanne	W	2 340	2 736	2 636	2 700	2 408	2 783
Hetkellinen tehonpudotus, lämmitys	+/- %	-49,5 %	-40,9 %	-43,1 %	-46,0 %	-51,9 %	-44,4 %
Tarkastelujakson huipputeho, lämmitys, vertailutapaus	W	5 005	5 005	5 005	5 005	5 005	5 005
Tarkastelujakson huipputeho, lämmitys, kysyntäjoustolla	W	5 842	4 744	5 410	4 732	5 154	5 941
Tarkastelujakson huipputeho, lämmitys	+/- %	16,7 %	-5,2 %	8,1 %	-5,4 %	3,0 %	18,7 %
Muutos tarkastelujakson kokonaisenergiankulutuksessa	+/- %	0,0 %	-0,2 %	-0,3 %	-0,1 %	-0,2 %	0,0 %

Sisälämpötilojen pysyvyyttä tarkastellessa selviää kuitenkin kysyntäjoustostrategian selkeä heikkous – strategia on hyödynnettävissä ainoastaan siihen asteeseen, jossa asunnon tai rakennuksen heikoin lenkki saavuttaa asetetun sisälämpötilan alarajan. Taulukossa 4 nähdään, että suurin osa asuntojen vyöhykkeistä reagoivat hyvin maltillisesti tehonpudotukseen samalla kun vyöhykkeen B31 MH-2 sisälämpötila on jo saavuttanut alarajan, eli 20 °C. Tämä johtuu pääosin vyöhykkeen suuresta lämpöhäviöstä, sillä se sijaitsee rakennuksen kulmassa ja rakennuksen ylimmässä kerroksessa (kuva 47), joten se on kosketuksissa ulkoilmaan niin ulkoseinien kuin yläpohjankin osalta. Lisäksi vyöhykkeen ikkunapinta-ala on merkittävä. Sähkölämmitteisiä vyöhykkeitä ei sisällytetty tarkasteluun, vaan tarkasteluun on sisällytetty vain vesikiertoisilla radiaattoreilla varustettuja vyöhykkeitä.



Kuva 47. Tarkasteltavien asuntojen heikoin lenkki: Asunto B31, vyöhyke MH-2 (punainen alue).

Heikointa lenkkiä (B31 MH-2) lukuun ottamatta, suurin muutos sisälämpötilassa on tarkasteltujen asuntojen osalta -0,7 °C ja keskimäärin -0,4 °C. On kuitenkin huomioitava,

että tässä on kyse keskimääräisestä ilman sisälämpötilasta ja että ihmisen aistima muutos (operatiivinen lämpötila) saattaa olla suurempi johtuen pintojen kylmenemisestä, kun rakenteet luovuttavat energiaa ympäristöön kysyntäjouston aikaan.

Taulukko 4. Case 1: Yhteenveto simuloituista minimilämpötiloista kysyntäjoustostrategian eri variaatioissa (värikoodaukset edustavat kunkin variaation tilakohtaisia sisälämpötilan suhteellisiä eroavaisuuksia).

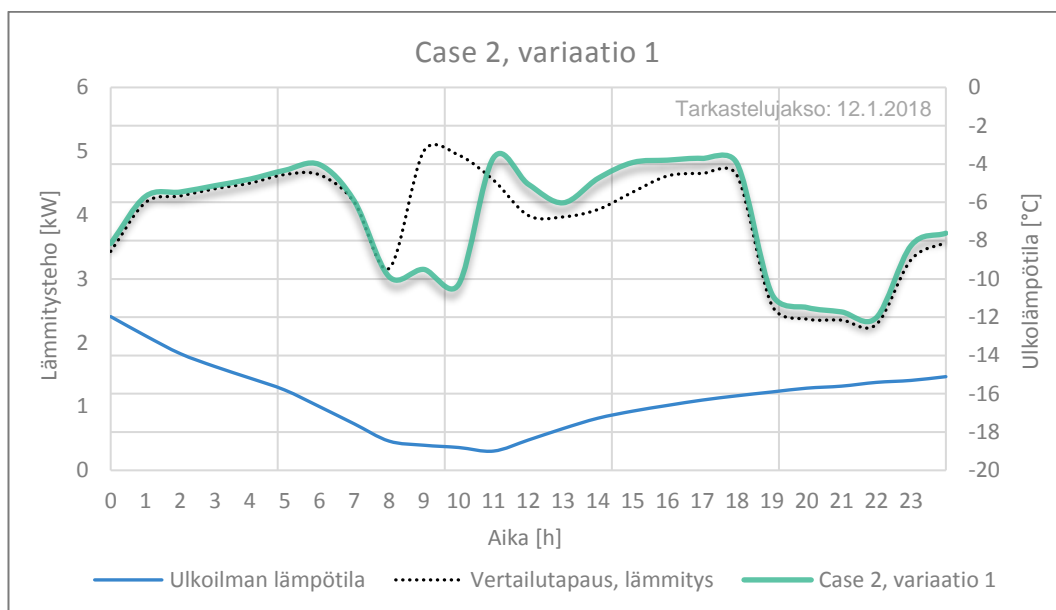
Vyöhyke	Vertailutapaus	Case 1, variaatio 1	Case 1, variaatio 5	Case 1, variaatio 8	Case 1, variaatio 9	Case 1, variaatio 10	Case 1, variaatio 11
	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C
B26 MH	21,41	21,34	21,35	21,37	21,18	21,13	21,17
B26 MH-1	21,29	20,74	20,77	20,83	20,60	20,60	20,60
B26 MH-2	21,43	21,39	21,41	21,42	21,28	21,24	21,28
B26 OH+K+(RT)+ET	21,30	21,15	21,15	21,17	21,10	21,10	21,11
B31 MH	21,43	21,28	21,33	21,33	21,12	21,07	21,11
B31 MH-1	21,42	21,32	21,36	21,36	21,15	21,11	21,15
B31 MH-2	20,95	20,06	20,00	20,05	19,97	19,97	19,97
B31 OH+K+(RT)+ET	20,90	20,54	20,41	20,42	20,41	20,39	20,42

4.4.2 Case 2: Vyöhykkeisiin kohdistuva ohjaus

Tutkittava strategia: Kysyntäjousto vyöhykkeiden sisälämpötilan asetusarvon poikkeuttamisella.

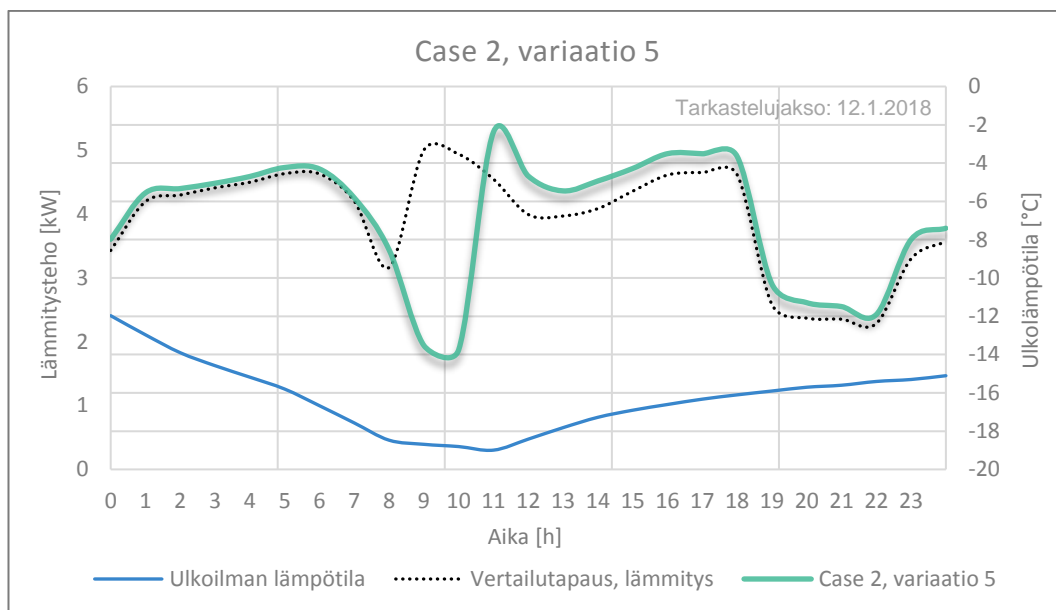
Kuvassa 48 on esitetty yksi esimerkki (Case 2, variaatio 1) strategian onnistuneesta toteuttamisesta. Tässä variaatiossa kaikkien vyöhykkeiden sisälämpötilan asetusarvot on poikkeutettu -1 °C klo 9.00–11.00 ja kysyntäjoustotapahtumasta on palautettu perus-

asetusarvolle välittömästi (kulmakerroin ∞) tapahtuman jälkeen. Tällä variaatiolla hetkelistä lämmitystehontarvetta on leikattu noin -37 % ja koko tarkastelujakson lämmityksen huipputehontarvetta vastaavasti noin -2 %.

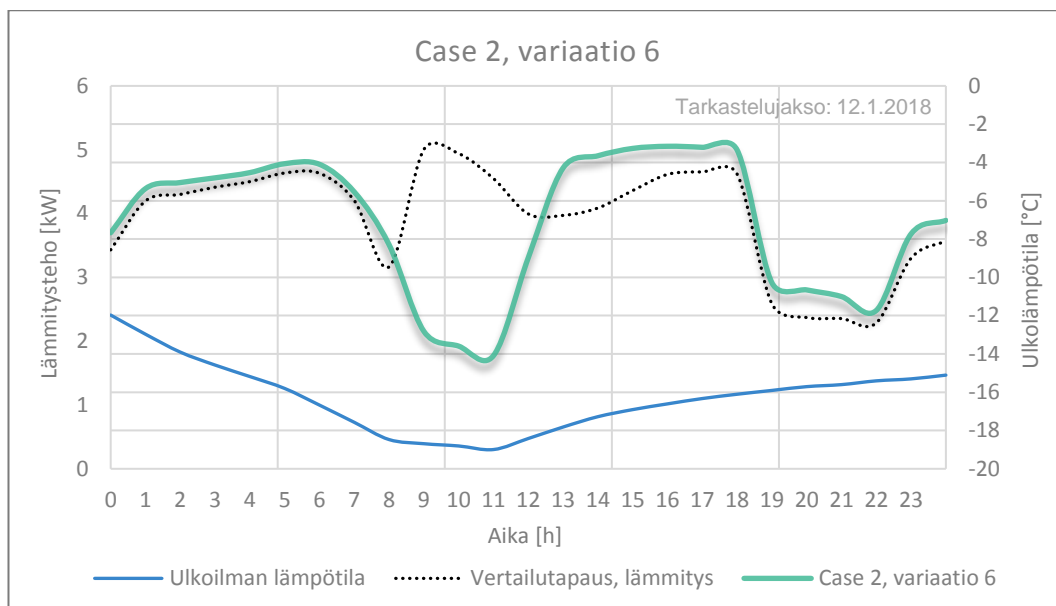


Kuva 48. Case 2, variaatio 1: Kysyntäjoustotapahtuma voimassa klo 9.00–11.00, -1 °C, palautuminen perusasetusarvoon välittömästi (kulmakerroin ∞) tapahtuman päättymisen jälkeen.

Kuvassa 49 on esitetty edellistä esimerkkiä vastaava variaatio (Case 2, variaatio 5) sillä erolla, että kaikkien vyöhykkeiden sisälämpötilan asetusarvoa on poikkeutettu $-1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Tällä variaatiolla on saavutettu noin -61% leikkaus hetkellisessä lämmitystehontarpeessa mutta noin $+6\%$ nousu koko tarkastelujakson lämmityksen huipputehontarpeessa. Tätä nousua voitiin periaatteessa kuitenkin mitätöidä strategian variaatiolla (Case 2, variaatio 6), jossa palautuminen oli loivempaa (kulmakerroin $0,7$). Tällöin hetkellistä lämmitystehontarvetta voitiin leikata edelleen noin -57% samalla kun tarkastelujakson huipputehontarve nousi vain noin $+1\%$. Tämä variaatio on esitetty kuvassa 50.

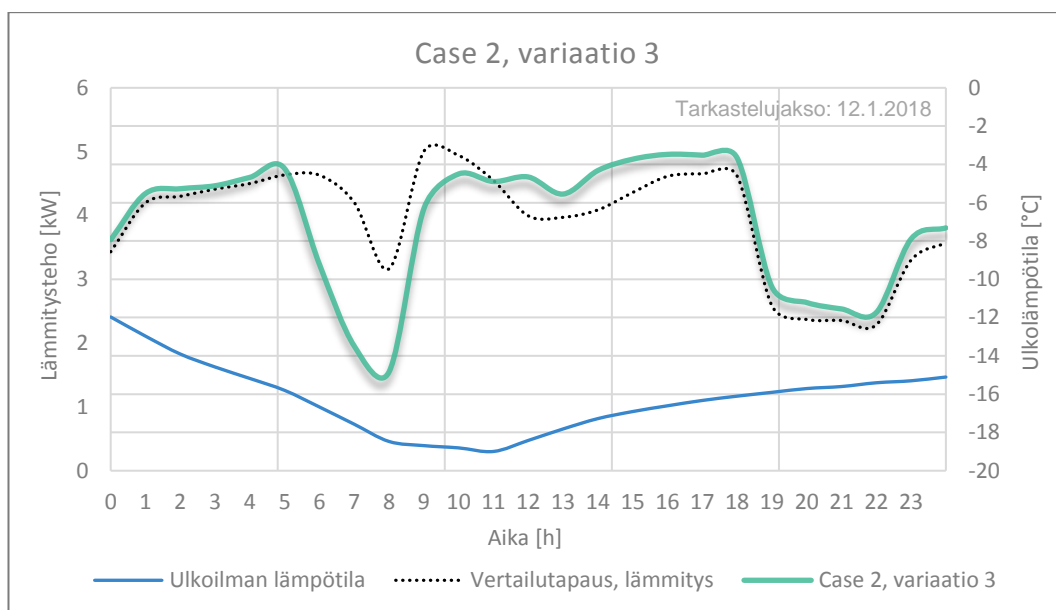


Kuva 49. Case 2, variaatio 5: Kysyntäjoustotapahtuma voimassa klo 9.00–11.00, $-1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, palautuminen perusasetusarvoon välittömästi (kulmakerroin ∞) tapahtuman päättymisen jälkeen.



Kuva 50. Case 2, variaatio 6: Kysyntäjoustotapahtuma voimassa klo 9.00–11.00, -1,5 °C, palautuminen perusasetusarvoon loivasti (kulmakerroin 0,7) klo 13.00:een mennessä tapahtuman päättymisestä.

Kuvassa 51 on esitetty toinen esimerkki (Case 2, variaatio 3) strategian onnistuneesta toteuttamisesta hieman eri ajankohtana. Tässä variaatiossa kaikkien vyöhykkeiden sisälämpötilan asetusarvot on poikkeutettu $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ klo 6.00–8.00 mutta edellisestä onnistuneesta esimerkistä poiketen, kysyntäjoustotapahtumasta on palaututtu loivasti (kulmakerroin 0,25) siten, että asetusarvot ovat palautuneet perusasetusarvoon klo 12.00:een mennessä lineaarisesti tapahtuman päättymisestä. Tällä variaatiolla hetkellistä lämmitystehontarvetta on leikattu noin -30% ja koko tarkastelujakson lämmityksen huipputehontarvetta vastaavasti noin -1% . Lyhentämällä palautusjaksoa (kulmakerroin 0,49) kahteen tuntiin (Case 2, variaatio 4) hetkellistä lämmitystehontarvetta on leikattu noin -31% mutta koko tarkastelujakson lämmityksen huipputehontarvetta on nostettu noin $+9\%$ ja jättämällä palautumisjakson kokonaan (Case 2, variaatio 2) pois (kulmakerroin ∞) hetkellistä lämmitystehontarvetta on leikattu noin -34% mutta koko tarkastelujakson lämmityksen huipputehontarvetta on nostettu noin $+7\%$. Näin ollen oikea-aikainen palautuminen kysyntäjoustotapahtumasta näyttäisi olevan tärkeä tekijä strategian hyödyntämisessä eikä loiva palautuminen aina takaa strategian onnistumista.



Kuva 51. Case 2, variaatio 3: Kysyntäjoustotapahtuma voimassa klo 6.00–8.00, $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$, palautuminen perusasetusarvoon loivasti (kulmakerroin 0,25) klo 12.00:een mennessä tapahtuman päättymisestä.

Taulukossa 5 on esitetty yhteenveto edellä käsitellyistä kysyntäjoustostrategian variaatioiden tuloksista. Lisäksi taulukossa on esitetty muutokset asuntojen energiankulutuksessa, jossa ei havaittu merkittävää muutosta. Myöskään tässä tapauksessa ei tehdä mitään johtopäätöksiä kysyntäjoustostrategian vaikutuksesta rakennuksen energiankulutukseen, sillä kyse on edelleen vain yhden vuorokauden tarkastelujaksosta.

Taulukko 5. Case 2: Yhteenveto tehonpudotuksista kysyntäjoustostrategian eri variaatioissa.

Case 2 Yhteenveto strategian variaatioista		Case 2, variaatio 1	Case 2, variaatio 2	Case 2, variaatio 3	Case 2, variaatio 4	Case 2, variaatio 5	Case 2, variaatio 6
Vyöhykkeiden sisälämpötilan asetusarvon poikkeutus	°C	-1,0	-1,0	-1,0	-1,0	-1,5	-1,5
Esilämmitys	h, ennen	-	-	-	-	-	-
Kysyntäjoustotapahtuman alku	klo	9.00	6.00	6.00	6.00	9.00	9.00
Kysyntäjoustotapahtuman päättymisen	klo	11.00	8.00	8.00	8.00	11.00	11.00
Asetusarvojen palautuminen perusasetusarvolle	h, jälkeen	-	-	4,0	2,0	-	2,0
Hetkellinen teho, lämmitys, vertailutapaus	W	5 005	4 630	4 630	4 630	5 005	5 005
Hetkellinen teho, lämmitys, ky- syntäjoustotilanne	W	3 148	3 075	3 232	3 186	1 942	2 154
Hetkellinen tehonpudotus, lämmitys	+/- %	-37,1 %	-33,6 %	-30,2 %	-31,2 %	-61,2 %	-57,0 %
Tarkastelujakson huipputeho, lämmitys, vertailutapaus	W	5 005	5 005	5 005	5 005	5 005	5 005
Tarkastelujakson huipputeho, lämmitys, kysyntäjoustolla	W	4 897	5 365	4 957	5 465	5 287	5 054
Tarkastelujakson huipputeho, lämmitys	+/- %	-2,2 %	7,2 %	-0,9 %	9,2 %	5,6 %	1,0 %
Muutos tarkastelujakson koko- naisenergiankulutuksessa	+/- %	0,1 %	-0,1 %	-0,3 %	-0,2 %	0,0 %	-0,1 %

Tämän kysyntäjoustostrategian osalta sisälämpötilojen pysyvyys ei aiheuttanut ongelmia, sillä strategiassa lämmöntuotannon tehoa ei rajoiteta, vaan vyöhykkeiden lämmitystehon pyyntiä vain lasketaan, jolloin sisälämpötilat ovat koko ajan säätöjärjestelmän hallinnassa. Kaikissa tapauksissa saavutettiin poikkeutetun asetusarvon sisälämpötila, lukuun ottamatta asunnon 26 olohuonetta (B26 OH+K+(RT)+ET), jossa sisälämpötila jäi usein hieman yli asetusarvon. Simuloidut sisälämpötilat ovat esitetty alla taulukossa 6.

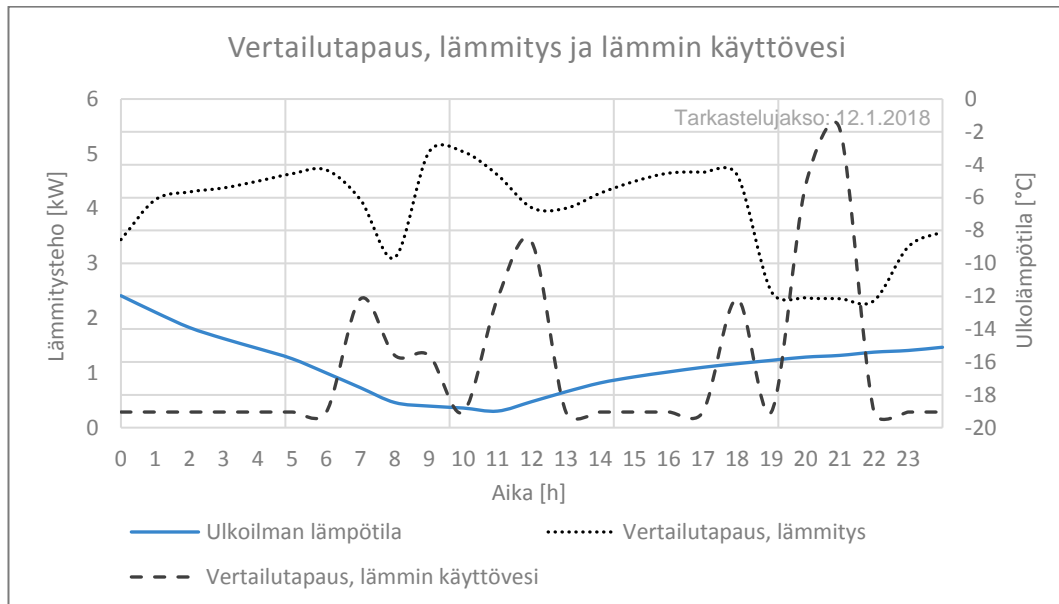
Taulukko 6. Case 2: Yhteenveto simuloituista minimilämpötiloista kysyntäjoustostrategian eri variaatioissa (värikoodaukset edustavat kunkin variaation tilakohtaisia sisälämpötilan suhteellisia eroavaisuuksia).

Case 2 Vyöhykkeiden sisälämpötilat	Vertailu- tapaus	Case 2, va- riaatio 1	Case 2, va- riaatio 2	Case 2, va- riaatio 3	Case 2, va- riaatio 4	Case 2, va- riaatio 5	Case 2, va- riaatio 6
	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C
B26 MH	21,41	20,48	20,45	20,44	20,45	19,98	19,97
B26 MH-1	21,29	20,48	20,49	20,37	20,39	19,97	19,97
B26 MH-2	21,43	20,48	20,49	20,46	20,47	19,99	19,99
B26 OH+K+(RT)+ET	21,30	20,48	20,58	20,52	20,55	20,23	20,15
B31 MH	21,43	20,49	20,45	20,45	20,45	19,98	19,98
B31 MH-1	21,42	20,48	20,46	20,45	20,45	19,97	19,97
B31 MH-2	20,95	20,50	20,43	20,43	20,43	19,99	20,00
B31 OH+K+(RT)+ET	20,90	20,49	20,53	20,26	20,28	19,99	19,99

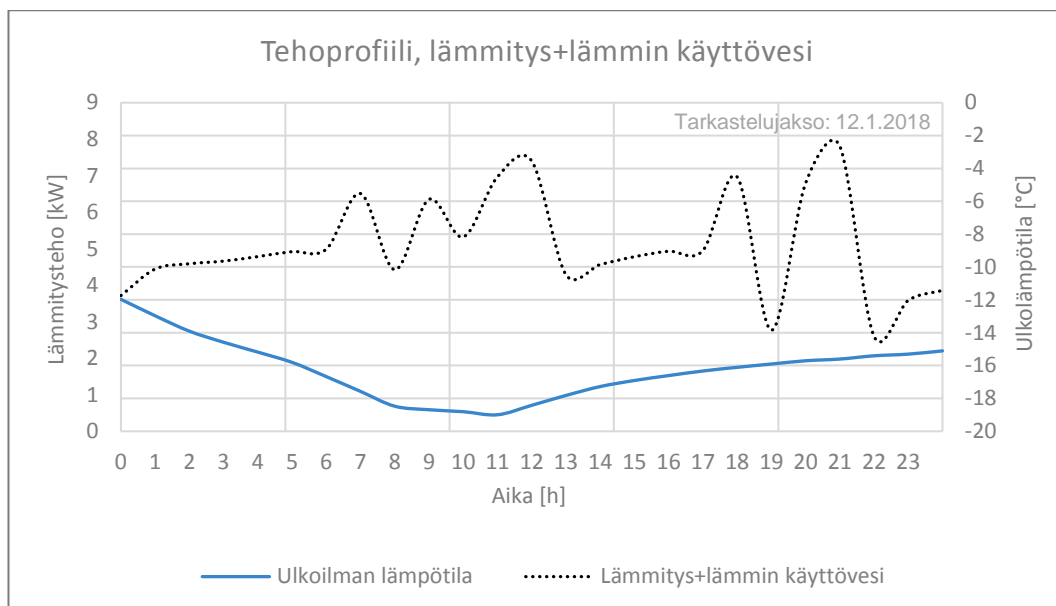
4.4.3 Case 3: Huipputehon rajoitus

*Tutkittava strategia: Lämmityksen huipputehon rajoitus lämpimän käyttöveden kulutus-
huipun aikana.*

Case 3:n simuloimiseksi tarkasteluun otettiin mukaan lämpimän käyttöveden kulutus-
vaihtelut. Strategian toteuttamistavassa hyödynnettiin edellisessä luvussa käsitelty vyö-
hykkeiden sisälämpötilan asetusarvon poikkeuttaminen, joka mukautettiin reagoimaan
lämpimän käyttöveden kulutushuippuihin. Kuvassa 52 esitetyssä vertailutapauksessa
nähdään, että lämpimän käyttöveden kaksi suurinta kulutushuippua ajoittuvat noin klo
12.00 ja 21.00 aikaan. Lisäksi kuvassa 53 on havainnoinnin vuoksi esitetty sekä lämmi-
tyksen että lämpimän käyttöveden tehoprofiili yhdistettynä.

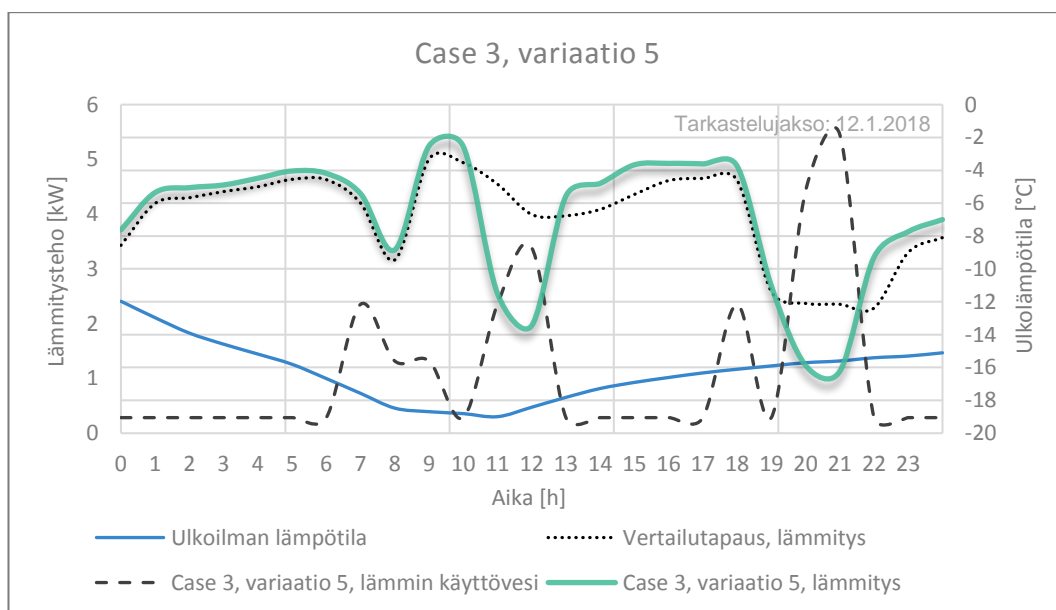


Kuva 52. Tarkastelujakson lämmityksen tehoprofiili lisättynä lämpimän käyttöveden tehoprofiililla, joka toimii tutkimuksen **vertailutapauksena**.

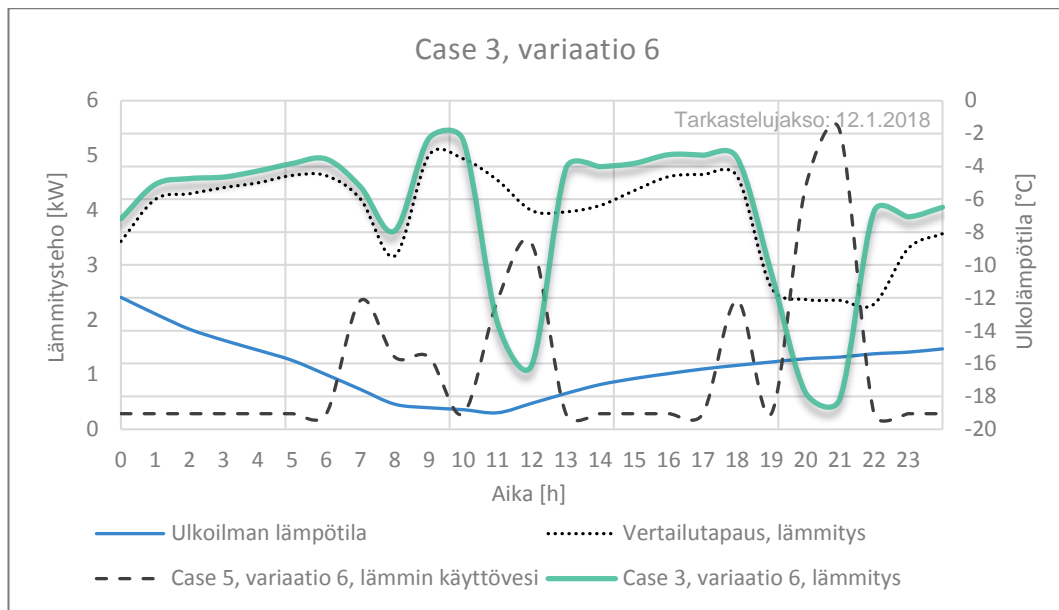


Kuva 53. Tarkastelujakson lämmityksen ja lämpimän käyttöveden tehoprofiili yhdistettynä yhdeksi kuvaajaksi, jossa nähdään, että asuntojen suurin yhteenlaskettu kulutushuippu ajoittuu noin klo 12.00:n ja 21.00:n aikaan.

Kuvassa 54 on esitetty yksi esimerkki (Case 3, variaatio 5) huipputehon rajoitusohjelman onnistuneesta toteuttamisesta. Tässä variaatiossa kaikkien vyöhykkeiden sisälämpötilan asetusarvot on poikkeutettu $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ klo 11.00–13.00 ja 20.00–22.00 välisinä aikoina ja perusasetusarvoihin on palautettu välittömästi (kulmakerroin ∞) huipputehon rajoitusohjelman jälkeen. Tällä variaatiolla hetkellistä lämmitystehontarvetta on klo 12.00:n tehohuipun aikaan leikattu noin -51% ja klo 21.00:n tehohuipun aikaan vastaavasti noin -52% . Näin on saavutettu noin $-7,4\%$ leikkaus asuntojen koko tarkastelujakson lämmitys ja lämpimänkäyttöveden yhteenlasketussa huipputehontarpeessa vertailutapaukseen nähden. Poikkeuttamalla kaikkien vyöhykkeiden sisälämpötilan asetusarvoja edellisestä poiketen $-1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ (kuva 55) ei saavutettu suurempaa huipputehon leikkausta, sillä seuraavaksi suurin huipputehontarve esiintyi klo 18.00 aikaan, joka jäi ennalta määritetyn rajoitusohjelman ulkopuolelle. Lisäksi jatkuva kuormanleikkaus vaikutti koko tarkastelujakson tehoprofiiliin, sillä simuloinneissa huipputehon rajoitusohjelma oli myös osa 14 vuorokauden käynnistysvaihetta, jonka vaikutus nähdään sekä kuvan 54 että kuvan 55 tehoprofiilissa (tehontarve on normaalitilanteessa hieman vertailutapausta suurempi).

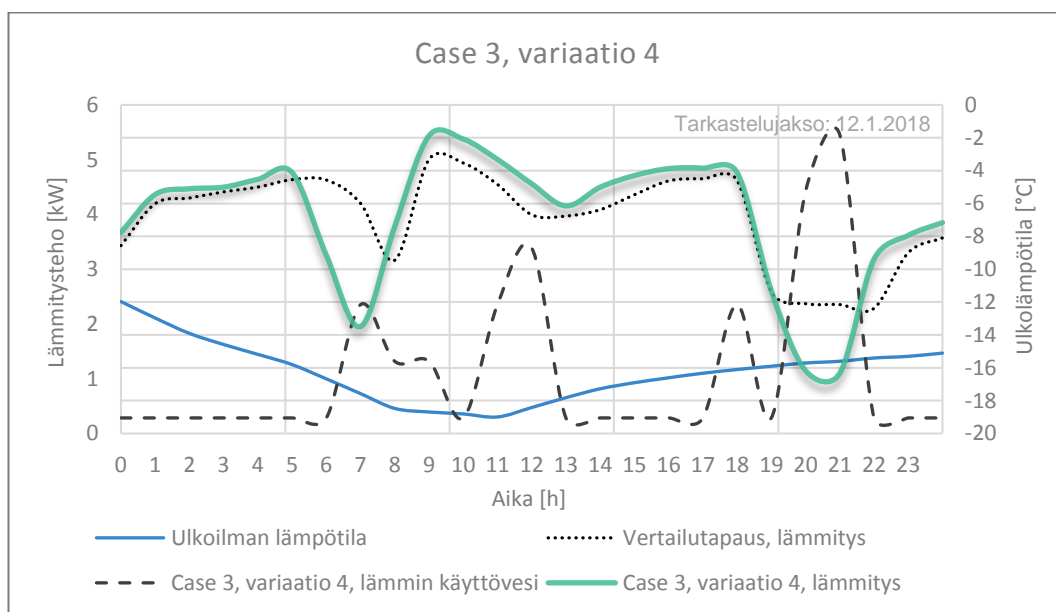


Kuva 54. Case 3, variaatio 5: Huipputehon rajoitus voimassa klo 11.00–13.00 ja 20.00–22.00, $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$, palautuminen perusasetusarvoon välittömästi (kulmakerroin ∞) tapahtumien päättymisen jälkeen.



Kuva 55. Case 3, variaatio 6: Huipputehon rajoitus voimassa klo 11.00–13.00 ja 20.00–22.00, -1,5 °C, palautuminen perusasetusarvoon välittömästi (kulmakerroin ∞) tapahtumien päättymisen jälkeen.

Kuvassa 56 on esitetty Case 3, variaatio 5 vastaava variaatio (Case 3, variaatio 4) mutta tässä variaatiossa klo 11.00–13.00 suoritettavaa tehonleikkaus on siirretty klo 6.00–8.00 väliseen aikaan. Tällä variaatiolla hetkellistä lämmitystehontarvetta on klo 7.00:n tehohuipun aikaan leikattu noin -53 % ja klo 21.00:n tehohuipun aikaan myös noin -53 % mutta koko tarkastelujakson lämmityksen ja lämpimän käyttöveden huipputehontarvetta ei ole leikattu, vaan se on kasvanut noin +2 %. Menetelmä on kysyntäjoustop näkökulmasta kuitenkin onnistunut mutta huipputehon rajoitusohjelman näkökulmasta epäonnistunut, sillä tarkastelujakson huipputehontarvetta ei ole onnistuttu leikkaamaan vaan se on jopa kasvanut hieman.



Kuva 56. Case 3, variaatio 4: Huipputehon rajoitus voimassa klo 6.00–8.00 ja 20.00–22.00, -1 °C, palautuminen perusasetusarvoon välittömästi (kulmakerroin ∞) tapahtumien päättymisen jälkeen.

Taulukossa 7 on esitetty yhteenveto huipputehon rajoitusohjelman tuloksista. Taulukossa jokaisen variaation molemmat ajankohdat on esitetty erikseen mutta kyse on kuitenkin edelleen samasta tarkastelujaksosta, jossa tehonleikkausta on suoritettu kaksi kertaa vuorokaudessa.

Taulukko 7. Case 3: Yhteenveto huipputehon rajoitusohjelman eri variaatioiden tuloksista (kuormanpudotus tapahtuu kaikissa tapauksissa (case) kaksi kertaa vuorokaudessa).

Case 3 Yhteenveto strategian variaatioista		Case 3, variaatio 4	Case 3, variaatio 4	Case 3, variaatio 5	Case 3, variaatio 5	Case 3, variaatio 6	Case 3, variaatio 6
Vyöhykkeiden sisälämpötilan asetusarvon poikkeutus	°C	-1,0	-1,0	-1,0	-1,0	-1,5	-1,5
Esilämmitys	h, ennen	-	-	-	-	-	-
Kysyntäjoustotapahtuman alku	klo	6.00	20.00	11.00	20.00	11.00	20.00
Kysyntäjoustotapahtuman päättyminen	klo	8.00	22.00	13.00	22.00	13.00	22.00
Asetusarvojen palautuminen perusasetusarvolle	h, jälkeen	-	-	-	-	-	-
Tehotarpeen tarkastelupiste	klo	7:00	21:00	12:00	21:00	12:00	21:00
Hetkellinen teho, lämmitys, vertailutapaus	W	4 158	2 354	4 017	2 354	4 017	2 354
Hetkellinen teho, lämmitys, ky- syntäjoustotilanne	W	1 952	1 099	1 963	1 130	1 167	551
Hetkellinen tehonpudotus, lämmitys	+/- %	-53,1 %	-53,3 %	-51,1 %	-52,0 %	-71,0 %	-76,6 %
Hetkellinen teho, lämmi- tys+lkv, vertailutapaus	W	6 511	7 809	7 403	7 809	7 403	7 809
Hetkellinen teho, lämmi- tys+lkv, kysyntäjoustotilanne	W	4 304	6 553	5 350	6 585	4 554	6 006
Hetkellinen tehonpudotus, lämmitys+lkv	+/- %	-33,9 %	-16,1 %	-27,7 %	-15,7 %	-38,5 %	-23,1 %
Tarkastelujakson huipputeho, lämmitys+lkv, vertailutapaus	W	7 809		7 809		7 809	
Tarkastelujakson huipputeho, lämmitys+lkv, kysyntäjoustolla	W	7 947		7 232		7 312	
Tarkastelujakson huipputeho, lämmitys+lkv	+/- %	1,8 %		-7,4 %		-6,4 %	
Muutos tarkastelujakson koko- naisenergiankulutuksessa	+/- %	-0,1 %		-0,2 %		-0,2 %	

4.5 Keskeiset havainnot ja johtopäätökset

Tässä osiossa tutkittiin kahden kysyntäjoustostrategian ja yhden huipputehon rajoitusohjelman hyödyntämistä kahden kerrostaloasunnon lämmityksen kuormanohjauksessa rakennussimulointiohjelmistoa hyödyntäen. Tarkastelu tehtiin kaikissa tapauksissa yhdelle vuorokaudelle, jossa asuntojen lämmitystehontarve oli suurimmillaan.

Case 1:n kohdalla tutkittiin lämmitystuotannon kysyntäjoustoon liittyvää kysyntäjoustostrategiaa, jossa rakennuksen lämmitysverkoston menolämpötilaa poikkeutettiin perusasetusarvosta -25 % eri vuorokauden aikoina 2 tunnin ajan. Menolämpötilan poikkeuttamisella luotiin sekä esilämmitystilanne että kuormanpudotustilanne ja lisäksi palautumisaikaa perusasetusarvoon muuttamalla voitiin välttää kysyntäjoustosta syntyvää jälkipiikkiä, eli kysyntäjoustotapahtumaa edeltävää tilannetta suurempaa kulutushuippua. Kahdella onnistuneella strategian variaatioilla saavutettiin yli 40 %:n leikkaus hetkellisessä huipputehossa ja yli 5 %:n leikkaus vuorokauden huipputehossa. Strategian tavoitteena oli hetkellisen huipputehon leikkaaminen ja sen katsottiin olevan onnistunut, mikäli kysyntäjoustotapahtumasta palautuminen tapahtui ilman jälkipiikkiä. Yksi keskeinen havainto oli tarkasteltavien asuntojen heikoimman lenkin vaikutus asuntojen kysyntäjoustopotentiaaliin. Tässä tapauksessa tarkasteltavien asuntojen heikoin lenkki, vyöhyke B31 MH 2, sijaitsi rakennuksen yläkulmassa, josta lämpöä johtui ulos sekä yläpohjasta että ulkoseinistä ja lisäksi asunnon ikkunapinta-ala oli merkittävä. Tällöin heikoimman lenkin saavutettua sisälämpötilan ehdottoman alarajan, 20 °C, toiseksi viileimmän tilan sisälämpötila oli edelleen 0,4 °C korkeampi ja useimpien tilojen sisälämpötila edelleen yli 21 °C. Normaalitilanteessa sisälämpötilan asetusarvo oli 21,5 °C mutta kysyntäjoustotapahtuman lähtötilanteessa sisälämpötilat vaihtelivat siten, että suurin lämpötilan pudotus oli todellisuudessa vain -1 °C, normaalitilanteeseen verrattuna, vaikka 20 °C:n alaraja saavutettiin. Tapauksessa havaittiin myös, että esilämmitystä hyödyntämällä, eli energian varaamisella rakenteisiin, voitiin saavuttaa yhä suurempi hetkellinen tehonleikkaus mutta simuloidussa ajankohdassa esilämmitystilanne nosti myös vuorokauden huipputehoa.

Case 2:n kohdalla tutkittiin vyöhykkeiden kysyntäjoustoon liittyvää kysyntäjoustostrategiaa, jossa kaikkien vyöhykkeiden sisälämpötilaa poikkeutettiin perusasetusarvosta -1 °C tai -1,5 °C eri vuorokauden aikoina 2 tunnin ajan. Edellisen tapauksen tavoin palautumisaikaa perusasetusarvoon muuttamalla voitiin välttyä kysyntäjouston jälkipiikistä (esilämmitystilannetta ei tämän tapauksen kohdalla tutkittu). Yhdessä onnistuneessa strategian variaatiossa, jossa asetusarvoja poikkeutettiin -1 °C, saavutettiin yli 35 %:n leikkaus hetkellisessä huipputehossa ja noin 2 %:n leikkaus vuorokauden huipputehossa ja toisella variaatiolla, jossa asetusarvoja poikkeutettiin -1,5 °C, saavutettiin yli 55 %:n leikkaus hetkellisessä huipputehossa, vuorokauden huipputehon kasvaessa noin 1 %. Tämän strategian kohdalla sisälämpötilojen pysyvyydestä ei muodostunut ongelma, sillä tuotantoa ei rajoitettu vaan sisälämpötilojen asetusarvoa vain laskettiin. Tällöin ohjaus- ja säätöjärjestelmät reagoivat muutokseen kuten tavanomaisessakin säätötilanteessa.

Tämän tapauksen kohdalla havaittiin, kuten kirjallisuus myös antaa ymmärtää, että käytetty strategia on tehokas ja luotettavasti hallittavissa oleva menetelmä toteuttaa kysyntäjoustoa kaukolämmityssä rakennuksessa (sisälämpötilojen pysyvyyteen nähden). Lisäksi strategialla ei tarvitse edellisen strategian tapaan huolehtia rakennuksen heikommasta lenkistä, sillä kaikkien vyöhykkeiden sisälämpötila pysyvät halutuissa asetusarvoissa. Järjestelmäratkaisun näkökulmasta strategian hyödynnettävyys vaatii vyöhykekohtaista säätöä, mikä on edellisen strategiaan verrattuna todennäköisesti kustannusraskaampi toteuttaa, varsinkin pelkästään kysyntäjouston tarkoitukseen.

Case 3:n kohdalla hyödynnettiin edellisen tapauksen menetelmiä huipputehon rajoitusohjelman tutkimiseksi, joka strategiana keskittyy rakennuksen energiakustannusten leikkaamiseen (kaukolämmön tilausvesivirta) eikä varsinaisesti kysyntäjoustoon siten kuin se on tässä työssä esitetty. Tapauksessa asuntojen lämmitystehoa leikattiin lämpimän käyttöveden kulutushuippujen aikaan, jossa tavoitteena oli asuntojen huipputehontarpeen pysyvä leikkaus. Tämä toteutettiin poikkeuttamalla sisälämpötilojen asetusarvoa $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ vuorokauden kahden suurimman käyttöveden kulutushuipun aikaan 2 tunnin sykleissä. Rajoitusohjelmalla saavutettiin yli 50 %:n leikkaus hetkellisessä lämmitystehontarpeessa ja noin 7,4 %:n leikkaus asuntojen vuorokauden huipputehontarpeessa. Poikkeuttamalla sisälämpötilojen asetusarvoa edellisestä poiketen $-1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ei saavutettu suurempaa huipputehon leikkausta, sillä tällöin vuorokauden huipputeho ajoittui ajalle, jota ei oltu ennakoon määritetty huipputehon rajoitusohjelmaan. Tämän perusteella olisi eduksi, että säätöjärjestelmä kykenisi ennakoimaan ja reagoimaan käyttöveden kulutustottumuksiin, jotta joustotapahtuma olisi luotettavimmin hallittavissa, ennakoon määritettyyn aikaohjelmaan verrattuna. Tämä voisi ajatella olevan karkealla tasolla saavutettavissa seuraamalla käyttövesisiirtimen säätöventtiilin ohjaussignaalin trendiä tai hyödyntämällä nykyaikaisia tekoälyyn perustuvia oppivia säätöjärjestelmiä, jotka hyödyntävät sääennustetta ja rakennuksesta saatavaa historia- ja mittaustietoa monipuolisesti. Simulointitulosten perusteella menetelmällä näyttäisi kuitenkin olevan mahdollista leikata tutkitun rakennuksen lämmityksen huipputehontarvetta pysyvästi ja sitä kautta pienentää rakennuksen kaukolämmön tilausvesivirtaamaa ja lämmitysenergiasta syntyviä kustannuksia. Tällöin asiaa tulisi kuitenkin tutkia tarkemmin muun muassa rakennuksen todellisilla mitatuilla kulutusarvoilla ja kalibroida energiamalli sen perusteella sekä tarkastella investoinnin takaisinmaksuaikaa elinkaarilaskennan kautta.

Tämän osion tutkimuksen avulla saavutettiin tietoa ja rakennussimulointiohjelmistoa hyödyntäen kokemusta kysyntäjoustostrategioiden mallinnusmenetelmistä, jotka pienin

mukautuksin vaikuttavat soveltuvan kokonaisen rakennuksen tai alueen kysyntäjoustopotentiaalin selvittämiseksi esimerkiksi energian hintatietoihin yhdistettynä. Lopuksi voidaan todeta, että rakennussimuloinnilla voidaan kohtalaisen yksinkertaisesti saada jonkinlainen käsitys rakennuksen termisestä kysyntäjoustopotentiaalista, mutta, sen sijaan että suunnitellaan valmiita ennalta määritettyjä staattisia kysyntäjoustostrategioita, säätöjärjestelmän olisi hyvä olla mahdollisimman dynaaminen ja kykenevä ennakoimaan mahdollisia lieveilmiöitä tai ainakin reagoimaan niihin siten, että ei aiheuteta jälkipiikkiä tai niin kutsuttua negatiivista kysyntäjoustoa.

Tutkimustuloksista kuormanpudotustehot ovat selkeästi sidottuja tutkimuskohteeseen ja lisäksi tutkimustulosten hyödyntämisessä tulee huomioda se, että sähkökäyttöisten lattialämmitysten mahdollista vaikutusta kysyntäjoustotapahtumaan ei tarkasteltu, tutkimuskohteena oli vain kaksi asuntoa ja lisäksi mahdollista johtumista viileämpään porraskäytävään ei huomioitu mallinnuksessa.

Pohdiskeluna voidaan vielä mainita, että tutkimuksen yhteydessä käsiteltiin hyvin rajallista otosta kysyntäjoustostrategioita, joiden toimivimmat variaatiot haettiin suurilta osin manuaalisesti pääosin kysyntäjoustoon liittyvien ilmiöiden tutkimiseksi. Periaatteessa kuhunkin rakennukseen soveltuvat optimaalisimmat kysyntäjoustostrategiat ja niiden variaatiot voisi kuitenkin nähdä olevan selvitettävissä suurilta osin automaattisesti yksinkertaisia algoritmeja mallintamalla ja mahdollisesti myös hyödyntämällä alalla yleistyvää monitavoiteoptimointia (MOBO). Tämä ei kuitenkaan vielä takaisi kysyntäjoustotapahtuman tai huipputehon rajoitusohjelman onnistumista todellisessa kohteessa, sillä kyse olisi edelleen ennalta määritetystä säätöohjelmasta, joskin optimoidusta sellaisesta, mutta se voisi tarjota kysyntäjouston ohjelmointia ja viritystä varten arvokasta ennakkotietoa rakennuksen käyttäytymisestä.

5 Toimintamalli kysyntäjouston toteuttamiseksi asuinkerrostaloissa

Kuten tässä työssä käsitelty aineisto antaa ymmärtää, on kysyntäjousto tekniseltä luonteeltaan poikkitieteellistä ja se kattaa hyvin laajan prosessin aina energiamarkkinoista rakennuksessa sijaitsevaan energiaa käyttävän laitteen toimintaan ja ohjaukseen – lisäksi siihen liittyy oleellisesti kuluttajan huomioiminen kysyntäjouston edistämisessä ja lopuksi sen toteuttamisessa. Kun tarkasteluun sisällytetään sekä sähkön että kaukolämmön kysyntäjousto, muodostuu näiden välille jo hyvin monimuotoinen ja laaja tutkimus-

alue, joka on pyritty rajaamaan keskittymällä pääosin asuinkerrostalojen kysyntäjouktoon ja siihen liittyviin teknisiin järjestelmiin sekä tietenkin muihin mahdollisiin oleellisiin kysymyksiin kysyntäjoukon toteuttamisessa. Kysyntäjoukon erityispiirteiden vuoksi on kehitettävä toimintamalli kuitenkin pääotsikoiden osalta pitkälti yleistettävissä myös muihin rakennustyyppeihin.

Kokemusta asuinkerrostalojen tai yleisesti rakennusten kysyntäjoukon toteuttamisesta ja siinä mietittävistä asioista näyttää Suomessa vielä olevan niukasti. Tämä tekee toimintamallin kehittämisestä haastavaa, sillä kysyntäjoukon yleisten periaatteiden ymmärtämiseksi on käytännössä lähdettävä tyhjästä ja kehitettävä malli tulee rakentaa täysin opinnäytetyön aikana tutkittuun kirjallisuuteen ja käytettävissä olevien resurssien puitteissa hankittuun kokemusperäiseen tietoon. Rakennusten kysyntäjouktoon keskittävää opetusaineistoa tai siihen liittyvää aiempaa toimintamallia ei ole työn aikana ilmennyt, joten tämä voidaan nähdä olevan ensimmäisiä pyrkimyksiä syntetisoidaan kysyntäjouktoon liittyvää selvitys- ja tutkimusaineistoa kysyntäjoukon toteuttamiseen tarkoitettua toimintamallia varten Suomessa.

Toimintamallia on kehitetty taustalla läpi koko opinnäytetyön, ja se perustuu opinnäytetyössä käsiteltyyn kirjallisuuteen ja rakennussimuloinneista saatuihin tietoihin ja kerrytystä kokemuksesta. Opinnäytetyö kuvaa täten kokonaisuutena käytännössä toimintamallin kehitysprosessia ja tutkimusvaiheita. Kirjallisuustutkimuksen kautta työssä tunnistettiin seuraavat pääasialliset kohdat kysyntäjoukon toteuttamisessa, jotka luovat rungon kehitetylle toimintamallille:

- Kysyntäjoukon markkinapaikat
Tehtävä: Tutustutaan kysyntäjoukon mahdollisiin markkinapaikkoihin
- Kysyntäjoukon ohjauspotentiaali
Tehtävä: Selvitetään rakennuksen kysyntäjoustopotentiaali
- Kysyntäjoukotapahtuman käynnistäminen
Tehtävä: Määritetään kysyntäjoukotapahtuman käynnistämisen ohjaustapa
- Kysyntäjoukotapahtuman todentaminen
Tehtävä: Määritetään kysyntäjoukotapahtuman todentamistapa
- Kysyntäjoukon järjestelmäratkaisu
Tehtävä: Määritetään kysyntäjoukon järjestelmäratkaisu
- Kysyntäjouktostrategiat
Tehtävä: Määritetään toteutettavissa olevat kysyntäjouktostrategiat

- Kysyntäjouaston käyttöönotto

Tehtävä: Suoritetaan kysyntäjouaston toimintakokeet ja otetaan järjestelmä käyttöön.

Toimintamallin tarkoituksena ei ole toimia kysyntäjouaston opetusmateriaalina tai suunnitteluohjeena, vaan yksinkertaistettuna tuoda ilmi kysyntäjouaston toteuttamisessa mieltäviä pääasiallisia kohtia. Käytännössä kehitetty toimintamalli edustaa alustavaa konseptia, jota on tarkoitus täydentää kokemusten karttuessa ja jalostaa toimivaksi ja tehokkaaksi tiekartaksi kysyntäjouaston toteuttamiseksi asuinkerrostaloissa. Toimintamalli on esitetty kokonaisuudessaan liitteessä 1.

6 Yhteenveto ja pohdinta

Opinnäytetyön keskeinen tavoite oli selvittää kysyntäjouaston toteuttamiseen liittyviä käytännön tehtäviä ja haasteita ja luoda malli kysyntäjouaston toteuttamiseksi asuinkerrostaloissa.

Ensimmäisen osan kirjallisuustutkimuksen avulla luotiin laaja yleisnäkymä sekä sähkön että kaukolämmön kysyntäjoudesta ja sen keskeisistä käsitteistä sekä sen tilanteesta suhteessa energiamarkkinoihin, lainsäädäntöön ja kotitalouksiin. Kysyntäjouaston toteuttamisen näkökulmasta todettiin, että toteutuksessa tulee tarkastella tilannetta aina energiamarkkinoista ohjattavaan kuormaan asti ja että kuormien soveltuvuus eri markkinoille on usein tapauskohtaista. Lainsäädännön osalta ei havaittu mitään tarkoituksenmukaisia esteitä kysyntäjouaston toteuttamiseksi vaan lainsäädäntö pyrkiikin edistämään kysyntäjouaston kehittymistä ja käyttöönottoa, vaikka myös selkeitä kehitystarpeita esiintyy. Kotitalouksien osalta todettiin, että pienkuluttajat ovat tärkeässä asemassa kysyntäjouaston edistämisessä mutta kyseisen kuluttajaryhmän saaminen osallistumaan kysyntäjouastoon sähkösopimusten kautta näyttää toistaiseksi haastavalta. Lisäksi todettiin, että käytännön toteuttamisen näkökulmasta kysyntäjousto olisi järkevä toteuttaa osana sellaista järjestelmäratkaisua, joka tarjoaa myös muita ominaisuuksia kuin ainoastaan kysyntäjousto, sillä kuluttajat ovat yleisesti kiinnostuneita energianhallintapalveluista ja etäohjauksen mahdollisuuksista.

Toisen osan kirjallisuustutkimuksen avulla luotiin selkeä kuvaus kysyntäjouaston toteuttamisen edellytyksistä, jälleen sekä sähkön että kaukolämmön kysyntäjouaston osalta ja lisäksi selvitettiin asuinkerrostalojen kysyntäjouaston toteuttamiseen liittyviä erityispiirteitä

ja yksityiskohtia sekä esitettiin esimerkkiratkaisu kysyntäjoustop toteuttamiseksi kodin energianhallintajärjestelmän periaatteita seuraten. Samalla todettiin kuitenkin myös se, että varsinaista optimaalista ratkaisua ei ole järkevä tai edes mahdollista yksiselitteisesti määrittää, ainakaan kustannus-, energia- ja elinkaaritehokkuuden näkökulmat huomioiden, sillä asuinkerrostalojen tekniset ratkaisut ja toteuttamistavat eroavat selkeästi toisistaan, aivan kuten muissakin rakennustyypeissä. Yleisesti kysyntäjoustop toteuttamisen osalta todettiin, että prosessin aikana tulee selvittää rakennuksen ohjattavissa olevaa tehopotentiaalia sekä huolellisesti määritellä kysyntäjoustop ohjaustekninen toteuttamistapa, eli niin kutsuttu kysyntäjoustopstrategia. Kysyntäjoustop tapahtuman käynnistämiseksi todettiin olevan useita vaihtoehtoja ja lisäksi luotettavat mittausmenetelmät ja avoimet rajapinnat ovat keskeisiä osajärjestelmiä kysyntäjoustop toteuttamisessa, joihin myös energiamarkkinat voivat asettaa vaatimuksia. Lisäksi todettiin, että kaukolämmön kysyntäjoustop luotettava hallinta vaatii todennäköisesti kykyä ennakoita ulkoisten tekijöiden vaikutusta rakennuksen lämmitystehontarpeeseen kysyntäjoustop tapahtuman aikana, jotta ei aiheuteta niin kutsuttua negatiivista kysyntäjoustopia. Tällöin puhutaan myös ennuste-epävarmuuden hallinnasta.

Kolmannessa osassa tutkittiin kahden kysyntäjoustopstrategian ja yhden huipputehon rajoitusohjelman hyödyntämistä ja niihin liittyviä ilmiöitä kahden kerrostaloasunnon lämmityksen kuormanohjauksessa rakennussimulointiohjelmistoa hyödyntäen. Tutkimuksen avulla saavutettiin arvokasta tietoa ja kokemusta tutkittujen kysyntäjoustopstrategioiden vahvuuksista ja heikkouksista ja lisäksi havaittiin, että huipputehon rajoitusohjelma on varteenotettava vaihtoehto energiakustannusten leikkaamiseksi kaukolämmityksessä kiinteistöissä. Tapaustutkimuskohteen osalta todettiin, että asunnot voisivat leikata hetkellistä lämmitystehontarvettaan tilanteesta riippuen noin 30–55 prosenttia kahden tunnin ajan, hyväksymällä noin 1–1,5 celsiusasteen pudotuksen sisälämpötilassa. Kaikissa tapauksissa saavutettiin yli 30 prosentin leikkaus hetkellisessä lämmitystehontarpeessa, kun hyväksyttiin 1 celsiusasteen sisälämpötilan pudotus asunnoissa. Huipputehon rajoitusohjelman osalta saavutettiin 1 celsiusasteen sisälämpötilan pudotuksella noin 7,4 prosentin leikkaus asuntojen kokonaistehontarpeessa käyttöveden kulutushuipun aikaan – on kuitenkin huomioitava, että tämä ei perustu kohteen todelliseen käyttöveden kulutukseen vaan kuviteltuun kulutusprofiiliin. Yleisesti rakennussimuloinnit vahvistivat osittain kirjallisuudesta selvinnyttä ennakkotietoa lämmityksen kysyntäjoustop ennuste-epävarmuuden hallinnasta. Ennalta määritetyt kysyntäjoustopstrategiat eivät kaikissa tapauksissa tuottanut haluttuja tuloksia esimerkiksi sisäisten ja ulkoisten lämpökuormien sekä ulkolämpötilan muutoksista johtuen, mikä saattaa johtaa negatiiviseen kysyntäjoustopiin.

Tässä tilanteessa tekoälynmenetelmiin perustuvat oppivat säätöjärjestelmät tuovat varmasti tilanteeseen apua nyt ja tulevaisuudessa.

Työn alussa mainittujen tapaustutkimukseen liittyvistä haasteista huolimatta opinnäyte-työn keskeinen tavoite saavutettiin ja lisäksi työtä ohjaaviin tutkimuskysymyksiin löydettiin suurilta osin vastaukset. Tosin asuinkerrostaloihin soveltuvien järjestelmäratkaisuiden osalta ei kuitenkaan käytettävissä olevien resurssien ja aikarajoitteiden puitteissa voitu tehdä yksityiskohtaisempia analyyseja kuten verrattavissa olevia elinkaarikustannuslaskelmia. Näin ollen tutkimusta voisi edelleen jatkaa vertailemalla eri laitevalmistajien ratkaisuja keskenään kustannus-, energia- ja elinkaaritehokkuuden näkökulmat huomioiden. Tämä edellyttää tietenkin sitä, että siihen tarvittavaa tietoa on riittävästi saatavilla. Lisäksi lämmityksen kysyntäjoustotilanteet ovat testiasuntojen osalta edelleen suoritettavissa ja verrattavissa rakennussimulointitapauksiin tulevalla talvijaksolla.

Työn hyödynnettävyyttä arvioidessa voidaan mainita, että työn aikana ei löydetty kysyntäjoustoprojektin toteuttamiseen liittyvää vastaavaa varsinaista toimintamallia tai prosessikuvausta, joten työssä kehitetty asiakirja voidaan nähdä edustavaan ensimmäisiä pyrkimyksiä syntetisöimään kysyntäjoustoprojektiin liittyvää selvitys- ja tutkimusaineistoa kysyntäjoustoprojektin toteuttamiseen tarkoitettua toimintamallia varten Suomessa. Toisaalta tulee myös huomioida, että toimintamalli perustuu suurelta osin kirjallisuuteen ja että toimintamalli tulee jatkossa kehittää kokemuksen karttuessa toimivaksi ja luotettavaksi malliksi kysyntäjoustoprojektin toteuttamiseksi asuinkerrostaloissa. Lisäksi voidaan mainita, että mallissa esitetyt käsitteet pätevät myös suurelta osin muihin rakennustyyppeihin. Kokonaisuutena työ tuo kysyntäjoustoprojektista kiinnostuneelle taholle tiivistetyn yleiskuvan kysyntäjoustoprojektin toteuttamisesta asuinkerrostaloissa, toimintamallin muodossa, ja lisäksi työn raporttiosuus tukee toimintamallia hyvin kattavasti.

Tämän työn aikana todettiin, että kysyntäjoustoprojektista voivat hyötyä monet yksittäiset tahot mutta siitä syntyvät taloudelliset säästöt eivät välttämättä vastaa odotuksia. Voidaan kuitenkin pohtia, onko kysyntäjoustoprojektin hyötyjen, kuten myös monen muun ympäristöön ja yhteiskuntaan vaikuttavan asian lähestyminen esimerkiksi vain taloudellisessa mielessä yksilö- tai yritystasolla kovin kauaskantoinen lähestymistapa, kun kysyntäjoustoprojektin hyödyt ulottuvat tätä huomattavasti laajemmalle alueelle. Menetelmällä voidaan muun muassa vähentää huipputeholaitoksien käyttöä sekä edistämään uusiutuvien energiamuotojen integroimista osaksi nykyisiä energiajärjestelmiä. Näin ollen menetelmällä voidaan epäsuorasti rajoittaa ihmisten ympäristölleen aiheuttaman haitan kasvua ja sitä kautta edis-

tää elämää ylläpitävien järjestelmien hyvinvointia, eli sellaisia järjestelmiä, jotka mahdollistavat ihmisten olemassaolon. Tietenkin tulee muistaa, että väärin toteutettuna kysyntäjoustolla voi myös olla vastakkaisia vaikutuksia.

Lähteet

Aarup, Marie; Svanborg, Karina; Nørregaard, Kjeld; Foged, Esben Vendelbo & Overgaard, Lars. 2014. DREAM – Danish renewable energy aligned markets Phase 1. Aarhus, Denmark: Danish Technological Institute.

Airaksinen, Miimu; Heiskanen, Eva; Hilden, Mikael; Kivimaa, Paula; Laitila, Päivi; Auvinen, Karoliina & Honkapuro, Samuli. 2017. Policy Brief: Rakennusten kysyntäjousto ja energiatehokkuus luovat perustan puhtaalle energijärjestelmälle. Verkkoaineisto. Smart Energy Transition. <http://smartenergytransition.fi/fi/rakennusten_kysyntajousto_ja_energiatehokkuus/>. Luettu 12.5.2018.

Alan toimijat. 2018. Verkkoaineisto. Energiavirasto. <<https://www.energiavirasto.fi/alan-toimijat>>. Luettu 19.4.2018.

Älyverkkotyöryhmä: Seuraavan sukupolven älykkäiden sähkömittareiden vähimmäistoiminnallisuudet. 2017. Pöyry Management Consulting Oy.

Annala, Salla. 2015. Households' willingness to engage in demand response in the Finnish retail electricity market: an empirical study (PhD Thesis). Lappeenranta: Lappeenranta University of Technology. ISBN: 978-952-265-850-0.

Anvari-Moghaddam, Amjad; Mokhtari, Ghassem & Guerrero, Josep M. 2016. Coordinated Demand Response and Distributed Generation Management in Residential Smart Microgrids. Energy Management of Distributed Generation Systems. IntechOpen, 57. <https://doi.org/10.5772/63379>.

Automated Demand Response in New Construction: Technical Design Guidelines. 2014. Energy Design Resources. <<https://energydesignresources.com/resources/publications/design-guidelines/automated-demand-response.aspx>>.

Automated Demand Response Today. 2012. Palo Alto, California, United States of America: Electric Power Research Institute (EPRI).

Automated Demand Response Using OpenADR. 2011. Application Guide Rev. 3. Siemens AG.

Auvinen, Karoliina; Honkapuro, Samuli; Ahola, Jero & Ahonen, Tero. 2018. Ratkaisuehdotuksia sähkön mittauksen haasteisiin kuluttajien ja energiayhteisöjen puhtaan pientuotannon edistämiseksi - Keskustelupaperi. Aalto-yliopiston julkaisusarja CROSSOVER, 4/2018. ISBN: 978-952-60-8087-1.

Avoin kaukolämpö ostohinnat. N.d. Verkkoaineisto. Fortum Oyj. <<https://www.fortum.fi/yrityksille-ja-yhteisoille/lammitys/kaukolampo-0/avoin-kaukolampo/avoin-kaukolampo-ostohinnat>>. Luettu 22.6.2018.

Azar, Ahmad Taher. 2015. Chaos Modeling and Control Systems Design. Toimittanut Sundarapandian Vaidyanathan ja Ahmad Taher Azar. Springer International Publishing. ISBN: 978-3-319-13132-0.

Azar, Armin; Olivero, Elisa; Hiller, Juliane; Lesch, Katharina; Jiao, Lei; Kolhe, Mohan; Asanalieva, Nazgul; Ferrez, Pierre; Zhang, Qi; Jacobsen, Rune & Siegl, Stefan. 2015. Algorithms for Demand Response and Load Control. Scalable Energy Management Infrastructure for Aggregation of Households (SEMIH).

Baumgartner, Petteri. 2013. Demand response ecosystems in the Nordic electricity markets (MSc Thesis). Tampere University of Technology.

Big, Oovidiu; Li, Hongwei & Svendsen, Svend. 2016. Demand side management for smart district heating. Energy Procedia.

Bojanczyk, Kamil. 2013. Redefining Home Energy Management Systems. Verkkoaineisto. GTM Research.
<<https://www.greentechmedia.com/articles/read/home-energy-management-systems-redefined#gs.psbRRyk>>. Luettu 18.6.2018.

Bremer, Olli; Frilander, Oona; Kaskinen, Tuuli & Malho, Maria. 2017. Kysyntäjousto kuluttajan näkökulmasta. Helsinki: Demos Helsinki. ISBN: 978-952-5844-26-9.

Cederlöf, Magnus. 2013. Euroopan unionin ilmastopolitiikka. Verkkoaineisto. Ympäristöministeriö. <http://www.ym.fi/fi-FI/Ymparisto/Ilmasto_ja_ilma/Ilmastonmuutoksen_hillitseminen/Euroopan_unionin_ilmastopolitiikka>. Luettu 12.4.2018.

Dagens priser. 2018. Verkkoaineisto. Stockholm Exergi.
<<https://www.oppenfjarrvarme.se/dagens-priser/>>. Luettu 22.6.2018.

Datahub - kohti keskitettyä tiedonvaihtoa. N.d. Verkkoaineisto. Fingrid Oyj.
<<https://www.ediel.fi/datahub>>. Luettu 22.6.2018.

Demad response for small to midsize business customers. 2010. CEATI International.

Demand Response: The Road Ahead. 2015. Wedgemere Group.

Demand response research center - Tools. 2018. Verkkoaineisto. Berkeley Lab.
<<https://drrc.lbl.gov/tools>>. Luettu 5.3.2018.

Digitalization and Energy. 2017. International Energy Agency (IEA).

Direktiivi 2009/72/EY. 2009. Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2009/72/EY sähkön sisämarkkinoita koskevista yhteisistä säännöistä ja direktiivin 2003/54/EY kumoamisesta.

Direktiivi 2010/31/EU. 2010. Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2010/31/EU rakennusten energiatehokkuudesta.

Direktiivi 2012/27/EU. 2012. Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2012/27/EU energiatehokkuudesta, direktiivien 2009/125/EY ja 2010/30/EU muuttamisesta sekä direktiivien 2004/8/EY ja 2006/32/EY kumoamisesta.

Direktiivi 2018/844. 2018. Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi (EU) 2018/844 rakennusten energiatehokkuudesta annetun direktiivin 2010/31/EU ja energiatehokkuudesta annetun direktiivin 2012/27/EU muuttamisesta.

Ehdotus lähes nollaenergiarakentamisen laskennan lähtötiedoiksi. 2014. FINVAC ry.

Energialaskennan testivuodet nykyilmastossa. 2012. Verkkoaineisto. Ilmatieteen laitos. <<https://ilmatieteenlaitos.fi/energialaskennan-testivuodet-nyky>>. Luettu 17.4.2018.

Explicit and Implicit Demand-Side Flexibility. 2016. Brussels, Belgium: Smart Energy Demand Coalition.

Foteinaki, Kyriaki; Heller, Alfred & Rode, Carsten. 2016. Modeling energy flexibility of low energy buildings utilizing thermal mass. Teoksessa In Proceedings of the 9th international conference on indoor air quality, ventilation & energy conservation in buildings.

Harsia, Pirkko; Penttinen, Sirja-Leena; Järventausta, Pertti; Sorri, Jaakko; Aalto, Pami; Kallioharju, Kari; Kaivo-oja, Jari; Kojo, Matti; Korpela, Timo; Ruostetsaari, Ilkka & Oksa, Anna M. 2017. Edellytykset kysyntäjoustop toteutumiselle kiinteistössä. EL-TRAN Analyysi. ISBN: 978-952-03-0393-8.

Heiskanen, Eva; Matschoss, Kaisa & Saastamoinen, Mika. 2012. Asiakkaan näkökulma älykkään sähköverkon lisäarvoon. Helsinki: Kuluttajatutkimuskeskus. ISBN: 978-951-698-246-8.

Home Connect – yhdistä kotisi. N.d. Verkkoaineisto. Home Connect GmbH. <<https://www.home-connect.com/fi/fi>>. Luettu 22.6.2018.

Honkapuro, Samuli & Auvinen, Karoliina. 2016. Policy brief: Sähkön kysyntäjoustop kasvu edellyttää hintakannustimia ja rakentamisen ohjausta. Verkkoaineisto. Smart Energy Transition. <<http://smartenergytransition.fi/fi/sahkon-kysyntajoustop-kasvu-edellyttaa-hintakannustimia-ja-rakentamisen-ohjausta/>>. Luettu 12.5.2018.

Huovinen, Anna. 2017. Flexible energy consumption must be increased as part of the energy system – while bearing consumer needs in mind. Verkkoaineisto. Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy. <<https://vttblog.com/tag/dyres/>>. Luettu 15.4.2018.

IDA Indoor Climate and Energy. 2018. Verkkoaineisto. EQUA Simulation AB. <<https://www.equa.se/fi/ida-ice>>. Luettu 25.4.2018.

Incorporating demand side flexibility, in particular demand response, in electricity markets. 2013. 442. SWD(2013). Brussels: European Commission.

Järvensivu, Paavo; Toivanen, Tero; Vadén, Tere; Lähde, Ville; Majava, Antti & Eronen, Jussi T. 2018. Governance of economic transition. Helsinki: BIOS Research Unit.

Järventausta, Pertti; Repo, Sami; Trygg, Petri; Rautiainen, Antti; Mutanen, Antti; Lummi, Kimmo; Supponen, Antti; Heljo, Juhani; Sorri, Jaakko; Harsia, Pirkko; Honkiniemi, Martti; Kallioharju, Kari; Piikkilä, Veijo; Luoma, Jaakko; Partanen, Jarmo; Honkapuro, Samuli; Valtonen, Petri; Tuunanen, Jussi & Belonogova, Nadezda. 2015. Kysynnän jousto - Suomeen soveltuvat käytännön ratkaisut ja vaikutukset verkkoyhtiöille (DR pooli): Loppuraportti. Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto. ISBN: 978-952-15-3485-0.

Julkaisu K1/2013, rakennusten kaukolämmitys, määräykset ja ohjeet. 2014. Energiateollisuus ry.

Kaksisuuntaisen kaukolämmön liiketoimintamallit. 2016. Helsinki: Energiateollisuus ry; Sitra.

Kärkkäinen, Seppo; Sipilä, Kari; Pirvola, Lauri; Esterinen, Juha; Eriksson, Esko; Soikkeli, Sakari; Nuutinen, Marjukka; Aarnio, Heikki; Schmitt, Frieder & Eisgruber, Claus. 2003. Demand side management of the district heating systems. Espoo: VTT Technical Research Centre of Finland.

Kärkkäinen, Seppo; Stifter, Matthias; Fechner, Hubert; Brunner, Helfried; Karppinen, Anna-Kaisa; Evens, Corentin; Ikäheimo, Jussi; Scorsoni, Giancarlo; Kamphuis, René; Chang, Seungchan; Lee, Won-Goo; Nam, Ki-Tae; Kwak, Hyeon-Hee; Kim, Hyung-Joong; Bañares, Susana; Villagarcía, Carmen Rodríguez; Ordiales, Miguel; Madina, Carlos; Bindewald, Gil; Calvert, Stan; DeBlasio, Richard & Silverstein, Alison. 2008. Integration of Demand Side Management, Distributed Generation, Renewable Energy Sources and Energy Storages. Vol 1: Main report. International Energy Agency Demand-Side Management Programme.

Kaukolämmön kysyntäjousto. 2015. Helsinki: Energiateollisuus ry.

Käytä kaukolämpöä oikein. 2007. Helsinki: Energiateollisuus ry. ISBN: 978-952-5615-12-8.

Kensby, Johan. 2015. Buildings as thermal energy storage: Pilot test and large-scale implementation for district heating systems (Licentiate Thesis). Gothenburg, Sweden: Chalmers University of Technology.

Kontu, Kaisa. 2014. District heating and cooling as part of smart energy systems (Licentiate Thesis). Helsinki: Aalto University.

Korpi, Ari. 2016. Huoneistoautomaation koetut hyödyt vapaarahoitteisessa asuntotuotannossa (Diplomityö). Aalto-yliopisto.

Kysynnänjouston pilottiprojekti. 2016. Vaasa: There Corporation Oy.

Kysyntäjousto. 2018. Verkkoaineisto. Fingrid Oyj.
<<https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/kysyntajousto/>>. Luettu 22.3.2018.

Lampropoulos, Ioannis; Kling, Wil L; Ribeiro, Paulo F & Berg, Jan van den. 2013. History of Demand Side Management and Classification of Demand Response Control Schemes. Vancouver, BC, Canada: IEEE.

Lehtinen, Teppo. 2017. Rakentamismääräyskokoelman mittava uudistus 2013–2017 valmis. Verkkoaineisto. Ympäristöministeriö. <[http://www.ym.fi/fi-FI/Ajankohtaista/Tiedotteet/Rakentamismaarayskokoelman_mittava_uudis\(45560\)](http://www.ym.fi/fi-FI/Ajankohtaista/Tiedotteet/Rakentamismaarayskokoelman_mittava_uudis(45560))>. Luettu 12.4.2018.

Lisää mukavuutta ja säästöjä lämmitykseen. 2018. Verkkoaineisto. Sanoma Media Finland Oy.
<https://www.rakentaja.fi/artikkelit/14232/toisen_sukupolven_danfoss_eco.htm>. Luettu 22.6.2018.

Liukku, Harri. 2015. Älyverkko ja miten se liittyy käyttäjäystävälliseen älyrakennukseen?. RIL 267-2015 Julkistamistilaisuus. Verkkoaineisto. ABB Oy.
<<http://www.ril.fi/kirjakauppa/attachment/download/c9234103ad2d639a39ab5bc9efe644e3>>. Luettu 29.5.2018.

Moeller, Jon. 2015. Question Of The Week: EMS, BMS, Or Both? Verkkoaineisto. FacilityExecutive.com. <<https://facilityexecutive.com/2015/12/ems-bms-or-both/>>. Luettu 8.6.2018.

Motegi, Naoya; Piette, Mary Ann; Watson, David; Kiliccote, Sila & Xu, Peng. 2007. Introduction to Commercial Building Control Strategies and Techniques for Demand Response. Berkeley, California, United States of America: Lawrence Berkeley National Laboratory.

Nacer, A; Marhic, B & Delahoche, L. 2017. Smart Home, Smart HEMS, Smart heating: An Overview of the Latest Products and Trends. Teoksessa Proceedings of the 6th International Conference on Systems and Control, University of Batna 2, 90–5. Batna, Algeria: IEEE.

Najewicz, David. 2009. Demand Response Enabled Appliances/Home Energy Management System. Golden, Colorado, United States of America: National Renewable Energy Laboratory (NREL).

Natural Capital at Risk: The Top 100 Externalities of Business. 2013. Trucost 2013.

Omar, Farhad & Bushby, Steven T. 2015. NIST Technical Note 1891: A Self-Learning Algorithm for Temperature Prediction in a Single Family Residence. National Institute of Standards and Technology (NIST). <https://doi.org/10.6028/NIST.TN.1891>.

OpenADR 2.0 Demand Response Program Implementation Guide. 2014. San Ramon, California, United States of America: OpenADR Alliance.

Pahkala, Tatu; Uimonen, Heidi & Väre, Ville. 2017. Matkalla kohti joustavaa ja asiakaskeskeistä sähköjärjestelmää (Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisuja 38/2017). Helsinki: Työ- ja elinkeinoministeriö. ISBN: 978-952-327-243-9.

Partanen, Jarmo; Viljainen, Satu; Lassila, Jukka; Honkapuro, Samuli; Salovaara, Kaisa; Annala, Salla & Makkonen, Mari. 2014. Sähkömarkkinat - opetusmoniste. Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen yliopisto.

Pesola, Aki; Bröckl, Marika & Vanhanen, Juha. 2011. Älykäs kaukolämpöjärjestelmä ja sen mahdollisuudet. Energiateollisuus ry.

Pylysy, Petri; Hupli, Jenni & Kero, Jukka. 2017. Asiantuntijakuuleminen: Valtioneuvoston kirjelmä eduskunnalle ehdotuksesta Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiiviksi energiatehokkuudesta annetun direktiivin 2012/27/EU muuttamisesta. Helsinki: Suomen Kiinteistöliitto ry.

Rakennukset käyttötarkoituksen ja lämmitysaineen mukaan. 2016. Verkkoaineisto. Suomen virallinen tilasto (SVT).
<http://pxnet2.stat.fi/PXWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin__asu__rakke/statfin_rakke_pxt_002.px/?rxid=00dc36c9-b498-415f-80b0-815e4004dfc0>. Luettu 30.3.2017.

RIL 267-2015 Käyttäjälähtöinen älyrakennus. 2015. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. ISBN: 978-951-758-598-9.

Ruokamo, Enni. 2017. Kotitaloudet valmiita kysyntäjoustoon, mutta ratkaisut puuttuvat. Verkkoaineisto. Kustannus Oy Lampila. <<https://www.energiatalous.fi/?p=1076>>. Luettu 10.4.2018.

Sähköä kannattaa käyttää joustavasti. 2018. Verkkoaineisto. Energiateollisuus ry. <https://energia.fi/perustietoa_energia-alasta/energiamarkkinat/sahkomarkkinat/kysyntajousto>. Luettu 22.3.2018.

Sähkömarkkinat. N.d. Verkkoaineisto. Energiateollisuus ry. <<http://energiamaailma.fi/mista-virtaa/sahkon-tie-kotiin/sahkomarkkinat/>>. Luettu 22.6.2018.

Sähkömarkkinat. 2018. Verkkoaineisto. Fingrid Oyj. <<https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/>>. Luettu 19.4.2018.

Sähkönsiirto. N.d. Verkkoaineisto. Caruna Oy. <<https://www.caruna.fi/caruna/sahkoverkko>>. Luettu 22.6.2018.

Sandberg, Esa. 2014. Sisäilmasto ja ilmastointijärjestelmät, Ilmastointitekniikka osa 1 & 2. Talotekniikka-Julkaisut Oy. ISBN: 978-952-99770-6-2, 978-952-99770-7-9.

Sarran, Lucile; Foteinaki, Kyriaki; Gianniou, Panagiota & Rode, Carsten. 2017. Impact of Building Design Parameters on Thermal Energy Flexibility in a Low-Energy Building. Teoksessa Building Simulation 2017. San Francisco, United States of America.

Sorri, Jaakko; Heljo, Juhani; Järventausta, Pertti; Honkapuro, Samuli & Harsia, Pirkko. 2016. Building Codes and Demand Response of Energy Use. Teoksessa S. Nenonen, & J-M. Junnonen (Eds.). Proceedings of the CIB World Building Congress 2016: Volume IV: Understanding Impacts and Functioning of Different Solutions, Vol. 4, 8-21. Tampere University of Technology. Department of Civil Engineering.

Suomen sähköjärjestelmä. 2018. Verkkoaineisto. Fingrid Oyj.
<<https://www.fingrid.fi/kantaverkko/suomen-sahkojarjestelma/>>. Luettu 19.4.2018.

Syri, Sanna & Kosonen, Risto. 2017. Esineiden internet optimoi rakennusten energiankulutusta. Verkkoaineisto. Aalto-yliopisto.
<<http://www.aalto.fi/fi/current/news/2017-02-09/>>. Luettu 16.2.2018.

The power market. 2018. Verkkoaineisto. Nord Pool.
<<https://www.nordpoolgroup.com/the-power-market/>>. Luettu 19.4.2018.

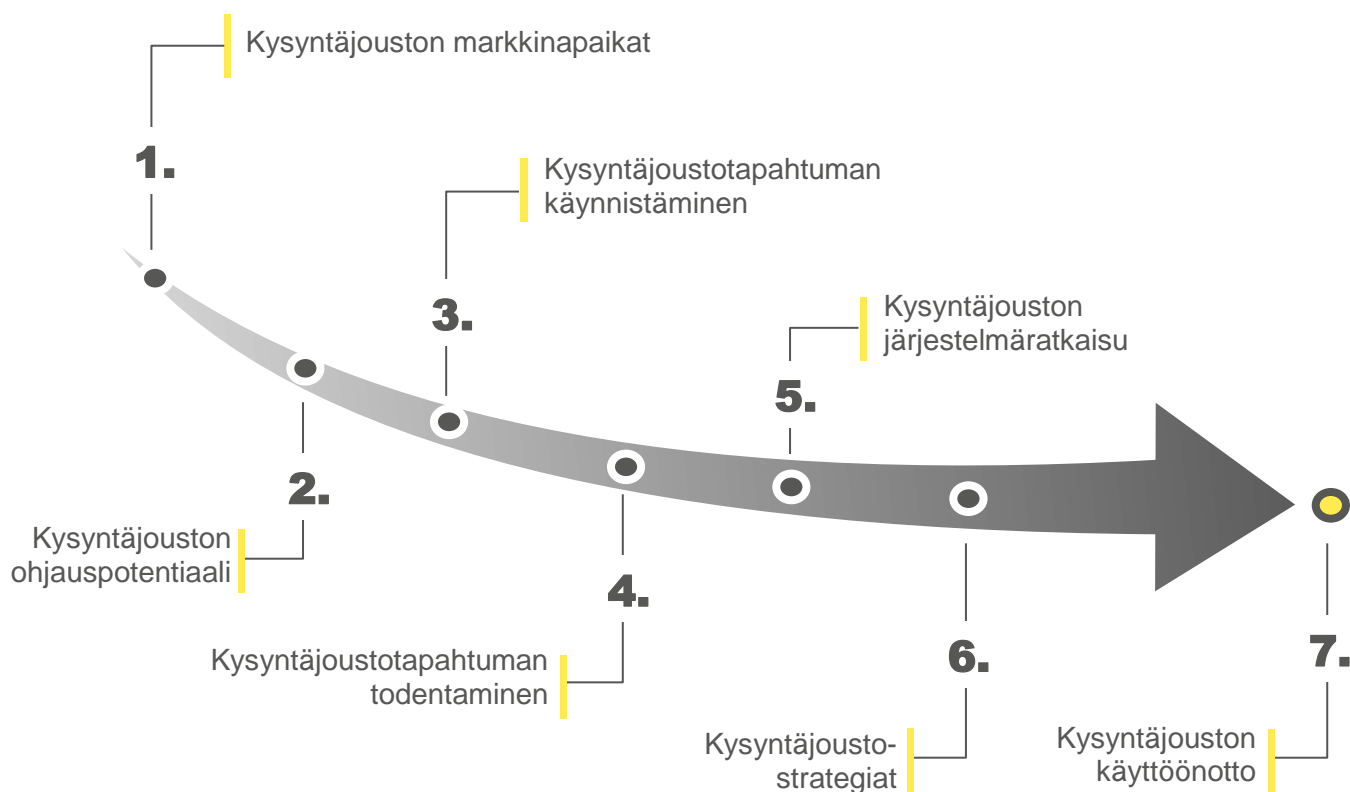
Vainio, Terttu; Airaksinen, Miimu & Vesanen, Teemu. 2017. Space heating measurement in apartment buildings. Espoo: Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy. ISBN: 978-951-38-8563-2.

Vihola, Jaakko; Sorri, Jaakko; Heljo, Juhani & Kero, Paavo. 2015. Heat loss rate of the Finnish building stock. Teoksessa Procedia Economics and Finance 21, 601–8. Elsevier B.V.

Weigand, Peter & Curran, Laura. N.d. Demand Response for Commercial Buildings is Coming of Age. Verkkoaineisto. AutomatedBuildings.com.
<<http://www.automatedbuildings.com/news/oct11/articles/skippingstone/110925123606skippingstone.html>>. Luettu 5.4.2018.

Wernstedt, Fredrik; Johansson, Christian & Wollerstrand, Janusz. 2008. Sänkning av returtemperaturer genom laststyrning. Svensk Fjärrvärme. ISBN: 978-91-7381-007-4.

TOIMINTAMALLI KYSYNTÄJOUSTON TOTEUTTAMISEKSI ASUINKERROSTALOISSA



Versio 1.0
12.10.2018

TÄMÄ TOIMINTAMALLI PERUSTUU VUONNA 2018 LAADITTUUN OPINNÄYTETYÖHÖN (YAMK):
TOIMINTAMALLI KYSYNTÄJOUSTON TOTEUTTAMISEKSI ASUINKERROSTALOISSA.

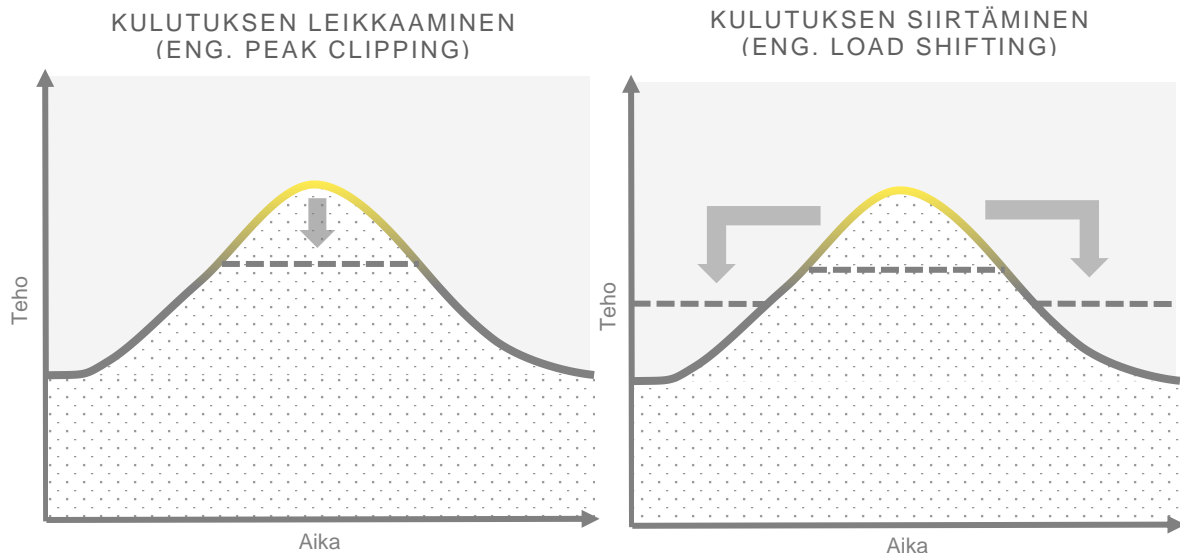
MIKÄ ON KYSYNTÄJOUSTO?

Käsitteenä Kysyntäjousto tai kysynnän jousto (eng. Demand Response tai DR) on kansainvälisesti tarkasteltuna osa laajempaa kysynnän tai kuorman hallinnan käsitettä (eng. Demand Side Management tai DSM), jossa energiankäyttöä hallitaan joko pysyvien ja pitkän aikavälin toimenpiteillä, eli energiatehokkuudella (kWh), tai tilapäisten ja lyhyen aikavälin toimenpiteillä, eli kysyntäjoustolla (kW).

Kysyntäjousto voi olla joko implisiittistä (myös hintaperusteinen), jolloin kuluttaja mukauttaa kulutustaan energian hintaan perustuen (tariffit) tai eksplisiittistä (myös kannustinperusteinen), jolloin kuluttaja mukauttaa kulutustaan erillistä korvausta vastaan energiatuotannon pyynnöstä. Tässä toimintamallissa viitataan eksplisiittiseen kysyntäjousto, jonka täytäntöönpano on kiinteistön puolella pääosin automatisoitu.

Toimintana Kysyntäjoustolla tarkoitetaan energian kysynnän hetkellistä muuttamista energiantuotannon ja -verkojen optimoimiseksi ja toimintavarmuuden takaamiseksi ja/tai siirtämistä kokonaan kuluttajan sekä ympäristön kannalta edullisempaan hetkeen.

Tarpeena Kysyntäjoustop keskeisiä tehtäviä ovat kulutushuippujen leikkaaminen tai siirtäminen (ks. kuva 1). Toiminnalla mahdollistetaan energiatuotannon optimointi, joka on sekä kuluttajalle että energiayhtiölle taloudellisesti hyödyllistä ja se edistää myös ympäristön hyvinvointia, kun fossiilisella polttoaineella käyvien huipputeholaitoksien käyttö vähentyy. Kysyntäjoustop edistämistä kiinteistöissä ajaa varsinkin sähköjärjestelmän osalta uusiutuvien energiamuotojen lisääntyminen energiantuotannossa, jotka eivät ole yksinkertaisin keinoin säädettävissä (esimerkiksi aurinko- ja tuulivoima).



Kuva 1. Kysyntäjoustop keskeiset menetelmät.

1. KYSYNTÄJOUSTON MARKKINAPAIKAT

Tutustutaan kysyntäjoustoprojektin mahdollisiin markkinapaikkoihin

Rakennuksen tekniset ratkaisut ja mahdollisuudet osallistua kysyntäjoustoprojektiin on osittain sidoksissa energiamarkkinoiden vaatimuksiin. Kysyntäjoustoprojektia harkittaessa tulee täten tarkastella asiaa aina markkinapaikasta ohjattavaan kuormaan asti. Näitä vaatimuksia on hyvä tarkastella läpi koko kysyntäjoustoprojektin, jotta voidaan varmistua eri kuormien ja ohjaustapojen soveltuvuudesta harkinnassa oleville markkinoille.

MARKKINAPAIKAT

Sähkö

Sähkön kysyntäjoustoprojektin on olemassa useita markkinapaikkoja. Markkinapaikkoja arvioitaessa tulee muun muassa huomioida markkinoiden asettamat vaatimukset tarjottavien kysyntäjoustoprojektin minimikoosta (MW), vasteajasta ja mittaus/-todentamistavasta.

Eräitä sähkön kysyntäjoustoprojektin markkinapaikkoja ovat:

- vuorokausimarkkinat (Nord Pool Elspot tai myös ns. Day-ahead markkinat)
- päivän sisäiset markkinat (Nord Pool Elbas tai myös ns. Intraday markkinat)
- säätösähkömarkkinat (Fingrid Oyj)
- reservimarkkinat (Fingrid Oyj).

Lisäksi sähkön vähittäismyyjät voivat hyödyntää kysyntäjoustoprojektin resursseja omassa tasehallinnassaan.

Aggregaattorin rooli: Asuinkerrostalojen tai yksittäisten asuntojen kuormat ovat yleisesti niin pieniä, ettei kysyntäjoustoprojektin markkinoille ole mahdollista osallistua ilman aggregaattoria, jolloin aggregaattori voi tarkentaa kysyntäjoustoprojektin resursseille asettamia vaatimuksia. Aggregaattori on uusi toimija energiamarkkinoilla, jonka tehtävänä on koota useiden pienempien energiankuluttajien resursseja kokonaisuudeksi, jolla on mahdollista käydä kauppaa energiamarkkinoilla. Aggregaattorin roolissa voi toimia sähkönmyyjä tai kokonaan itsenäinen toimija.

Kaukolämpö

Kaukolämmön kysyntäjoustoprojektin ei yleisesti ole olemassa avoimia energiamarkkinoita, vaan kysyntäjoustoprojektin saatava tuotto tulee arvioida tapauskohtaisesti kaukolämpöyhtiön tai aggregaattorin kanssa saavutetun sopimuksen perusteella.

ENERGIAN TOIMITUSKETJU

Sähkö

Sähkön toimitusketju koostuu yksinkertaistettuna seuraavista osajärjestelmistä ja niiden haltijoista:

- sähkön tuotanto: useita toimijoita
- sähkön jakelu
 - kantaverkko (110-400 kV): Fingrid Oyj
 - alueverkot (110 kV): useita toimijoita
 - jakeluverkot (0,4-70 kV): useita toimijoita
- sähkön myynti: useita toimijoita.

Kaukolämpö

Kaukolämmön toimitusketju koostuu yksinkertaistettuna seuraavista osajärjestelmistä ja niiden haltijoista:

- kaukolämmön tuotanto: pääosin kaukolämpöyhtiö
- kaukolämmön jakelu: kaukolämpöyhtiö
- kaukolämmön myynti: kaukolämpöyhtiö.

2. KYSYNTÄJOUSTON OHJAUSPOTENTIAALI

Selvitetään rakennuksen kysyntäjoustopotentiaali

Jotta rakennusta voidaan hyödyntää kysyntäjoustopotentialissa, tulee rakennuksesta löytyä ohjattavissa olevia kuormia. Nämä tulee hankkeesta riippuen joko selvittää tai määrittää esimerkiksi rakennuksen suunnitteluvaiheessa. Kestävän kehityksen näkökulmasta tulee kuitenkin ensisijaisesti pyrkiä mahdollisimman pieniin huipputehoihin.

OHJATTAVISSA OLEVAT KUORMAT

Sähkö

Sähkön kysyntäjoustopotentialin kannalta asuinkerrostalot eivät yleensä muodosta kovin merkittävää ohjauspotentialia. Lämpöpumput ovat kuitenkin yleistymässä asuinkerrostalojen lämmitysmenetelmänä, jonka myötä kysyntäjoustopotentialin tarve lisääntyy.

Eräitä merkittäviä yleisiä sähkökuormia ovat:

- autolämmitys (tulevaisuudessa mahdollisesti myös sähköautojen latauspisteet)
- kiukaat
- sähkökäyttöiset lattialämmitykset.

Eräitä merkittäviä kuluttajalaittekuormia ovat:

- pyykinpesukone
- pyykinpuhdistin
- astianpesukone.

Kaukolämpö

Kaukolämmön kysyntäjoustopotentialin kannalta asuinkerrostalot muodostavat merkittävän ohjauspotentialin, sillä suurin osa Suomen asuinkerrostaloista lämmitetään kauko- tai aluelämmöllä.

Kysyntäjoustopotentialia voidaan toteuttaa esimerkiksi kaukolämpökeskuksessa tai asuntokohtaisten elektronisten patteritermostaattien avulla.

Arvioiden mukaan vuosina 1940 – 2002 rakennetut rakennukset soveltuvat parhaiten hyödynnettäväksi kaukolämmön kysyntäjoustopotentialissa.

OHJATTAVISSA OLEVIEN KUORMIEN TEHO

Sähkö

Sähkön kysyntäjoustopotentialin tehopotentialia muodostuu rakennuksen ohjattavissa olevista sähkölaitteista mutta ei näiden sähkölaitteiden nimellistehojen summasta. Sähkölaitteet käyvät usein osateholla ja niiden käyttöaste ja käyttöajat suhteessa kysyntäjoustopotentialin ajankohtaan eroavat toisistaan, joten tehopotentialin arvioimiseen liittyy monen muuttujan huomioon ottamista.

Eräitä sähkön kysyntäjoustopotentialin arvioimisessa käytettäviä menetelmiä ovat:

- taulukkolaskenta (esim. ST-kortti 13.31 kuvaama menetelmä huipputehojen arvioimiseen)
- erilliset kysyntäjoustopotentialin arvioimiseen tarkoitettavat ohjelmistot (esim. VTT DyRES)
- kenttäkokeet ja historiatiedot (esimerkiksi olemassa olevien rakennusten kohdalla)

Kaukolämpö

Kaukolämmön kysyntäjoustopotentialin tehopotentialia muodostuu yksinkertaistetusti ilmaistuna rakennuksen lämpöhäviöstä ja lämmönvarausominaisuuksista vallitsevassa säätilassa yhdistettynä sisäisillä lämpökuormilla sekä lämmitysjärjestelmän tyypistä ja hyötysuhteesta, jonka perusteella rakennuksen hetkellinen lämmitysteho määräytyy. Tämä on varsin dynaaminen prosessi, joten tehopotentialin arvioimiseen liittyy hyvin monta muuttujaa.

Eräitä lämmityksen kysyntäjoustopotentialin arvioimisessa käytettäviä menetelmiä ovat:

- taulukkolaskenta
- rakennussimulointiohjelmistot (esim. IDA ICE).

- mahdollisesti rakennussimulointiohjelmistot.

3. KYSYNTÄJOUSTOTAPAHTUMAN KÄYNNISTÄMINEN

Määritetään kysyntäjoustotapahtuman käynnistämisen ohjaustapa

Jotta kysyntäjoustotapahtuma voidaan käynnistää, tulee sille olla selkeä ohjaustapa. Tähän on tällä hetkellä olemassa useita vaihtoehtoja mutta mikäli pyritään toteuttamaan sekä sähkön että kaukolämmön kysyntäjoustoa olisi järkevä yhtenäistää ohjaustavat yhteen järjestelmään.

OHJAUSTIEDON VASTAANOTTAMINEN

Sähkö

Eräitä sähkön kysyntäjoustotapahtuman käynnistämisen ohjaustapoja:

- ohjaustieto tuodaan etäluettavalle sähkömittarille, eli AMR-mittarille (eng. Automatic meter reading), joka ohjaa yksittäistä kuormaa mittarin apureleiden avulla
- ohjaustieto tuodaan AMR-mittarin apureleiden kautta joko yksittäisen laitteen, asunnon tai rakennuksen automaatiojärjestelmälle
- ohjaustieto tuodaan erillisen järjestelmän (esim. internet) kautta ohjattavalle laitteelle/laitekokonaisuudelle (IoT-kokoonpano)
- ohjaustieto tuodaan erillisen järjestelmän (esim. internet) kautta joko rakennuksen tai asunnon automaatiojärjestelmälle.

Kaukolämpö

Eräitä kaukolämmön kysyntäjoustotapahtuman käynnistämisen ohjaustapoja:

- ohjaustieto tuodaan kaukolämmön mittauskeskukselta kaukolämpökeskukselle, joka ohjaa esimerkiksi lämmitysverkoston säätöventtiiliä
- ohjaustieto tuodaan erillisen järjestelmän (esim. internet) kautta ohjattavalle laitteelle/laitekokonaisuudelle (IoT-kokoonpano)
- ohjaustieto tuodaan erillisen järjestelmän (esim. internet) kautta joko rakennuksen tai asunnon automaatiojärjestelmälle.

Rakennusautomaatiojärjestelmien edellytyksenä on vähintään standardin EN-SFS 15232 energiatehokkuusluokan B-tason järjestelmä.

4. KYSYNTÄJOUSTOTAPAHTUMAN TODENTAMINEN

Määritetään kysyntäjoustotapahtuman todentamistapa

Jotta energiatuotantoa voidaan optimoida ja kysyntäjoustolla käydä kauppaa tulee kysyntäjousto olla luotettavasti todennettavissa, eli mitattavissa, markkinoiden edellyttämällä tavalla ja vasteajalla. Eri osapuolet tarvitsevat muun muassa tietoa kuormanpudotuspyynnön vastaanottamisesta, toteutuneista ohjauksista ja niiden suuruudesta (teho) sekä kuormanpudotuksen kestosta.

MITTAUSJÄRJESTELMÄT

Sähkö

Suomalaiset rakennukset ovat lähes poikkeuksetta varustettu etäluettavilla sähkömittareilla (AMR – Automatic meter reading). Sähkön kysyntäjouaston osalta vasteajan tulee kuitenkin monessa tapauksissa olla lyhyempi kuin nykyiset AMR-mittarit mahdollistavat, joten kysyntäjouaston

Kaukolämpö

Kaukolämmön kysyntäjouaston osalta voidaan rakennustasolla pitkälti seurata nykyisiä käytäntöjä, sillä useimmissa kaukolämmityskiinteistöissä on etäluettava kaksisuuntaista kommunikointia mahdollistava mittausjärjestelmä.

tehokas hyödyntäminen vaatii todennäköisesti edistyskäsittelyä mittausjärjestelmiä. AMR-mittarin hyödyntäminen nykyisissä asuinkerrostaloissa liittyy myös käytännön haasteita mittareiden kirjavasta asennustavasta ja ominaisuuksien heikosta hyödyntämistavasta johtuen.

Mittaamiseen liittyy kuitenkin haasteita, mikäli syntyvät säästöt halutaan kohdentaa asuntokohtaisesti asuntojen lämmitystehoa ja -energiankulutusta mittaamalla, sillä siihen vaadittuja mittausjärjestelmiä ja toimintatapoja ei yleisesti Suomessa ole käytössä.

Kaukolämmön kysyntäjousto nähdään olevan sähkön kysyntäjousto vaikeammin hallittavissa, sillä monet ulkoiset tekijät (aurinko, ihmiset, muut lämmityslaitteet jne.) ehtivät vaikuttaa lämmitystehontarpeeseen kysyntäjousto-tapahtuman aikana. Tämä johtuu siitä, että lämmitysjärjestelmät reagoivat sähkökuormiin verrattuna hitaasti muutoksiin. Kaukolämmön kysyntäjousto korostuu täten myös muiden kuin lämmityksen energia- ja tehomittausten hyödyntäminen kysyntäjousto toteuttamisessa. Tällöin puhutaan myös ennuste-epävarmuuden hallinnasta.

RAJAPINNAT

Sähkö

Sähkön kysyntäjoustoissa AMR-mittarin avulla tai kautta toteutettavat käskyt mahdollistavat vain tuntitason ohjaukset, joka parhaassa tapauksessa rajoittaa kysyntäjousto hyödyntämistä käytännössä vain vuorokausi- ja tuntimarkkinoille. Kysyntäjousto tehokas hyödyntäminen vaatii nykyisiä etäluettavia sähkömittareita edistyskäsittelyä järjestelmiä, jolloin vaihtoehtona on tällä hetkellä jonkin tasoinen automaatiojärjestelmä ja internetin kautta tapahtuva kommunikointi. Seuraavan sukupolven älymittarit (AMR 2.0) ja kehittyvä lainsäädäntö voivat kuitenkin vaikuttaa tilanteeseen.

Eräitä energianhallinnassa ja kysyntäjoustoissa hyödynnettäviä rajapintoja, jonka kautta rakennus pystyy vastaanottamaan ja välittämään tarvittavaa tietoa rakennuksen ulkopuolisille osapuolille internetin välityksellä ovat:

- IEC CIM (IEC-61968-9)
- EN 50491-12
- EEBus
- OpenADR.

Kaukolämpö

Kaukolämmön kysyntäjousto osalta rajapinta määräytyy pitkälti kaukolämpöyhtiön etäluettavan mittausjärjestelmän käyttämän rajapinnan mukaan. Mikäli pyritään toteuttamaan sekä sähkön että kaukolämmön kysyntäjousto, rajapintana olisi tällöin järkevä käyttää yhteistä energianhallinnan rajapintaa (esim. internetin välityksellä).

5. KYSYNTÄJOUSTON JÄRJESTELMÄRATKAISU

Määritetään kysyntäjoustop järjestelmäratkaisu

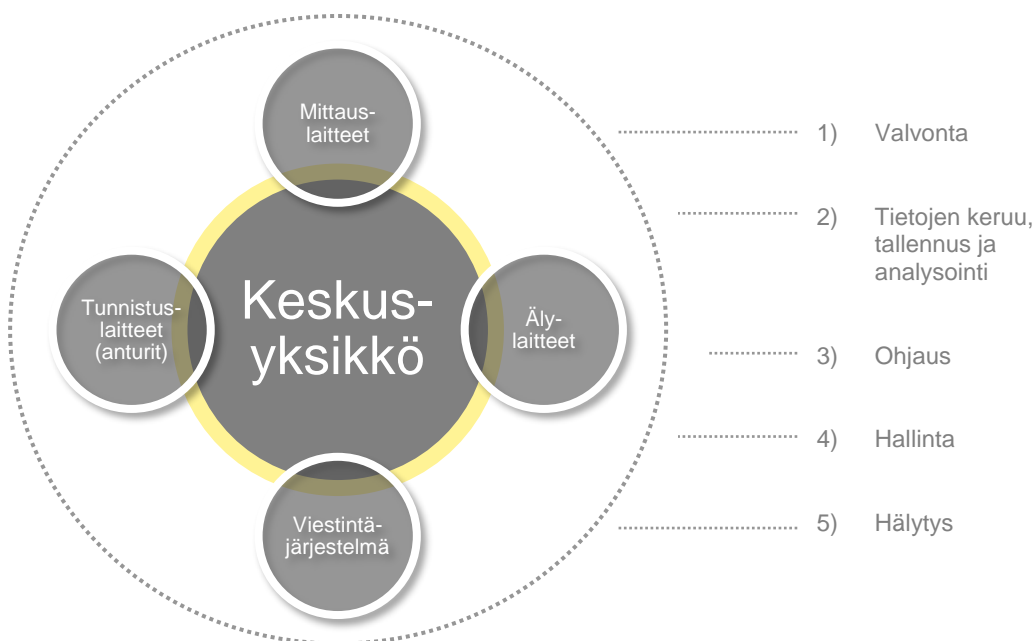
Jotta rakennus voi osallistua kysyntäjoustop, tulee rakennuksesta löytyä kysyntäjoustop mahdollistavat teknologiset ratkaisut. Järjestelmä voi olla vain kysyntäjoustop mahdollistava mutta usein kysyntäjoustop on vain yksi osa teknologian tarjoamista ominaisuuksista.

JÄRJESTELMÄRATKAISUT

Asuinkerrostaloon soveltuva järjestelmäratkaisu riippuu monesta tekijästä sekä siitä, onko kyseessä uusi tai olemassa oleva rakennus. Yleisesti kysyntäjoustop asettamat vaatimukset voidaan ottaa huomioon pienin toimenpitein, mikäli rakennuksesta löytyy monipuolinen rakennusautomaatiojärjestelmä.

Eräs varsinkin olemassa oleville asuinkerrostaloille soveltuva järjestelmäratkaisu on niin kutsuttu kodin energianhallintajärjestelmä tai HEMS-järjestelmä (Home Energy Management System), joka voi koostua seuraavista komponenteista:

- älykkäästä mittausjärjestelmästä, joka mahdollistaa energian reaaliaikaisen mittaamisen ja tiedon edelleen välittämisen;
- tunnistuslaitteista, eli antureista, joilla mitataan oleellisia suureita (lämpötila, paikallaolo, valoisuus jne.);
- älykkäistä viestintään kykenevistä kodinkoneista ja sähkölaitteista;
- viestintäjärjestelmästä, esimerkiksi langattomasta (Thread, ZigBee, EnOcean, Z-Wave, Wi-Fi jne.), jonka avulla mittausjärjestelmät, anturit ja sähkölaitteet pystyvät lähettämään ja vastaanottamaan tietoa; ja
- älykkäästä keskusyksiköstä, jolla laitteet integroidaan yhdeksi kokonaisuudeksi ja joka hallitsee ja optimoi laitteiden käyttöä ja keskustelelee käyttäjien sekä rakennusten ulkopuolisten osapuolten kanssa (sähkönmyyjä, aggregaattori jne.) esimerkiksi kysyntäjoustop ja muiden energianhallintapalveluiden mahdollistamiseksi.



Kuva 2. HEMS-ratkaisun kokoonpano ja keskeiset toiminnallisuudet.

6. KYSYNTÄJOUSTOSTRATEGIAT

Määritetään toteutettavissa olevat kysyntäjoustostrategiat

Jotta kysyntäjousto voidaan onnistuneesti toteuttaa aiheuttamatta haittaa rakennuksen käyttäjille, laitteille tai itse rakennukselle, tulee kysyntäjouston ohjaustekninen toteuttamistapa suunnitella. Tällöin voidaan puhua kysyntäjoustostrategiasta, joita löytyy vähintään niin monta variaatioita kuin teknisiä järjestelmäkokonaisuuksiakin. Taloteknisten järjestelmien kysyntäjoustostrategioita määrittäessä hyödynnettävät strategiat voidaan prioriteettijärjestyksessä jakaa kolmeen tasoon: 1) vyöhykkeisiin kohdistuva ohjaus; 2) ilmanjakeluun kohdistuva ohjaus; tai 3) tuotantoon kohdistuva ohjaus.

KYSYNTÄJOUSTO- STRATEGIAT

Sähkö

Sähkön kysyntäjousto voi yllä mainitun mukaisesti kohdistua joko vyöhykkeisiin, ilmanjakeluun tai tuotantoon ja sillä on vaikutusta myös rakennuksen lämmitystehontarpeeseen. Lisäksi sähkön kysyntäjousto voidaan kohdistaa valaistukseen ja kuluttajalaitteisiin.

Sähkön kysyntäjoustostrategioita suunnitellessa korostuu käyttäjien haittojen minimoiminen. Varsinkin kuluttajalaitteiden kysyntäjoustostrategioissa kysyntäjousto saattaa olla käyttäjälle näkyvää ja käyttäjän tuleekin voida keskeyttää kysyntäjousto paikallisesti niin halutessaan.

Kaukolämpö

Kaukolämmön kysyntäjousto voi yllä mainitun mukaisesti kohdistua joko vyöhykkeisiin, ilmanjakeluun tai tuotantoon. Ilmanvaihdon kysyntäjousto ei kuitenkaan asuinkerrostalojen kohdalla nähdä mieluisana vaihtoehtona.

Yleisesti kaukolämmön kysyntäjoustostrategiat ovat oikein toteutettuina käyttäjille pääosin huomaamattomia mutta tekijät kuten ihmisten kulutustottumukset, lämpökuormat ja muuttuva säätila voivat kuitenkin vaikuttaa kysyntäjouston onnistumiseen. Näiden tekijöiden luotettava hallinta ja ennustaminen luovat edellytykset kaukolämmön kysyntäjouston onnistumiseen.

Eräitä kaukolämmön kysyntäjoustostrategioita:

- Lämmitysverkostojen menolämpötilan asetusarvon poikkeuttaminen (tuotantoon kohdistuva ohjaus)
- Vyöhykkeen sisälämpötilan asetusarvon poikkeuttaminen (vyöhykkeisiin kohdistuva ohjaus).

Lisäksi kysyntäjousto varten laaditut strategiat ovat hyödynnettävissä huipputehon rajoitusohjelmissa, jonka avulla rakennuksen huipputehoa pyritään pysyvästi rajoittamaan energiakustannusten leikkaamiseksi. Tämä ei kuitenkaan varsinaisesti edusta kysyntäjoustoja niin kuin se on tässä asiakirjassa esitetty, sillä tarkastelualueena on ainoastaan rakennuksen energiajärjestelmä eikä koko energian toimitusketju.

Mietittäviä asioita kysyntäjoustostrategioita suunniteltaessa ja toteutettaessa ovat ainakin seuraavat:

- Minkä tyyppisille taloteknisille järjestelmille strategia on soveltuva?
- Mille markkinoille pyritään osallistumaan ja mikä on vaadittu vasteaika?
- Pyritäänkö strategialla leikkaamaan, siirtämään tai rajoittamaan huippukulutusta?
- Millaisille kuormille strategia kohdennetaan tai millaiset kuormat ovat hyödynnettävissä?

- Miten kuormanpudotuksen teho arvioidaan tai voidaan arvioida?
- Millaisia ohjaus- ja säätöjärjestelmiä tarvitaan strategian toteuttamiseksi?
- Miten nopeasti kuormanpudotus voidaan järjestelmäteknisesti saavuttaa? Tuleeko ohjaus käynnistää ennen varsinaista kysyntäjoustopahtumaa?
- Mikä on strategian ohjausjärjestys ja millaisia raja-arvoja järjestelmillä on?
- Mikä on strategian vaikutus ihmisiin, laitteisiin ja järjestelmiin sekä ympäristöön?
- Miten ulkoiset tekijät kuten säätilaa, ihmiset ja muut laitteet huomioidaan?
- Miten käyttäjä pystyy keskeyttämään kuormanpudotuksen?
- Miten kuormanpudotus mitataan ja todennetaan?
- Miten kysyntäjoustopahtumasta palaututaan? Voiko strategia aiheuttaa jälkipiikin (=ns. negatiivinen kysyntäjousto)?

Kysyntäjoustostrategioita suunnitellessa korostuu ennen kaikkea, kuten energiajärjestelmien optimoinnissa yleisesti, rakennuksen pääasiallisen käyttötarkoituksen priorisoiminen ja käyttäjien huomioiminen. Kuvassa 3 on esitetty yksi esimerkki kysyntäjoustopahtumien ohjausjärjestyksestä.



Kuva 3. Esimerkki kysyntäjoustopahtumien ohjausjärjestyksestä ja toimintojen priorisoinnista.

7. KYSYNTÄJOUSTON KÄYTTÖÖNOTTO

Suoritetaan kysyntäjoustopahtumien toimintakokeet ja otetaan järjestelmä käyttöön

KÄYTTÖÖNOTTO

Kun edellisissä luvuissa mainitut asiat on otettu huomioon ja kaikki kysyntäjoustopahtumoihin liittyvät taloudelliset ja tekniset asiat on ratkaistu ja mahdolliset asennukset toteutettu, tulee kysyntäjoustopahtumatoiminnolle järjestää toimintakokeet, aivan kuten muidenkin taloteknisten järjestelmien käyttöönotossa. Toimintakokeissa voidaan käynnistää eri tyyppisiä kysyntäjoustopahtumia manuaalisesti ja verrata toteutuneita kuormanpudotustehoja laskennallisesti arvioituihin kuormanpudotustehoihin.

1 Energiamallinnuksen lähtötiedot

1.1 Perustiedot

Perustiedot	Arvo
Rakennuksen valmistumisvuosi	2009
Sisälämpötilan asetusarvo	20...21,5 °C
Mitoittava ulkolämpötila	-26 °C
Simuloinnissa käytetty säätiedosto	Helsingin testivuosi 2012 versio (TRY2012)
Ilmanvaihtojärjestelmän kuvaus	Asuntokohtainen tulo- ja poistoilmanvaihtojärjestelmä lämmöntalteenotolla
Lämmitysjärjestelmän kuvaus	Vesikiertoinen radiaattorilämmitys (kaukolämpö)
Jäähdytys-/viilennysjärjestelmän kuvaus	Ei jäähdytystä tai viilennystä
Rakennusvaipan ilmanvuotoluku (q50)	4,0 m ³ /(h m ² (ulkoseinä)) 50 Pa:n paine-erolla (IDA ICE tuuliprofiili: AIVC "Semi-exposed")

1.1.1 Käytetyt piirustukset

Piirustus	Tiedostomuoto	Suunnitteluala	Sisältö	Tekijä	Viimeisin päiväys
ARK-5	.pdf	Arkkitehtisuunnittelu	Talo AB, julkisivut	Arkkitehtitoimisto L-N	10.4.2007
LVI-304-A	.pdf	Ilmanvaihtosuunnittelu	Rakennus 1, osa 1, 4. kerros	Optiplan	26.9.2007
LVI-303-A	.pdf	Ilmanvaihtosuunnittelu	Rakennus 1, osa 1, 3. kerros	Optiplan	26.9.2007
50-A	.pdf	Rakennesuunnittelu	Rakennetyypit, kerrostalot AB ja CD	Optiplan	14.1.2008
Tiedosto: 4080hH4014	.dwg	Sähkösuunnittelu	Ryhmityspiirustus, Talo AB, 4. kerros (+ARK pohjapiirustus)	Optiplan	25.10.2007
Tiedosto: 4080hH4013	.dwg	Sähkösuunnittelu	Ryhmityspiirustus, Talo AB, 3. kerros (+ARK pohjapiirustus)	Optiplan	25.10.2007

1.2 Rakennusvaippa

1.2.1 Rakenteet

Rakenneosa	U-arvo	Rakennusmateriaali	Rakennusmateriaalin paksuus	Rakennusmateriaalin lämmönjohtavuus	Rakennusmateriaalin tiheys	Rakennusmateriaalin ominaislämpökapasiteetti	Lähde
	W/(m ² K)		m	W/(mK)	kg/m ³	J/(kgK)	
	0,25	Betoni	0,100	2,000	2400	1000	

Ulkoseinä (US1)		Lämmöneriste	0,120	0,043	150	1030	Materiaalien paksuus ja tyyppi: Piirustus RAK-50-A Materiaalien ominaisuudet: RakMK C4 2012, lämmöneriste muokattu
		Tuulensuojalevy	0,045	0,070	250	1700	
		Ilmarako	0,040	0,400	1	1006	
		Julkisivumuuraus	0,135	0,600	1500	1000	
Välipohja, yleensä (VP1)	0,16	Tasoite	0,020	0,135	500	1000	Materiaalien paksuus ja tyyppi: Piirustus RAK-50-A Materiaalien ominaisuudet: RakMK C4 2012
		Ontelolaatta	0,111	2,000	2400	1000	
			0,148	0,025	1,23	1008	
			0,111	2,000	2400	1000	
Välipohja, märkätilat (VP2)	0,03	Tasoite	0,020	0,135	500	1000	Materiaalien paksuus ja tyyppi: Piirustus RAK-50-A Materiaalien ominaisuudet: RakMK C4 2012
		Kololaatta	0,066	2,000	2400	1000	
			0,088	0,025	1,23	1008	
			0,066	2,000	2400	1000	
Yläpohja (YP1)	0,16	Suojakiveys	0,030	0,100	300	1000	Materiaalien paksuus ja tyyppi: Piirustus RAK-50-A Materiaalien ominaisuudet: RakMK C4 2012, kevytsora muokattu
		Kevytsojabetonilaatta	0,060	0,450	1200	1000	
		Kevytsoira	0,530	0,167	300	1000	
		Ontelolaatta	0,06	2,000	2400	1000	
			0,06	0,025	1,23	1008	
			0,08	2,000	2400	1000	
Kantava väliseinä 1 (VS1)	3,70	Betoni	0,2	2,000	2400	1000	Materiaalien paksuus ja tyyppi: Piirustus RAK-50-A Materiaalien ominaisuudet: RakMK C4 2012
Väliseinä (VS2)	2,18	Kipsilevy	0,013	0,210	700	1000	Materiaalien paksuus ja tyyppi: Piirustus RAK-50-A Materiaalien ominaisuudet: RakMK C4 2012
		Ilmaväli	0,066	0,400	1	1006	
		Kipsilevy	0,013	0,210	700	1000	
Kantava väliseinä 2 (VS3)	2,70	Betoni	0,15	2,000	2400	1000	Materiaalien paksuus ja tyyppi: Piirustus RAK-50-A Materiaalien ominaisuudet: RakMK C4 2012
		Ilmarako	0,02	0,400	1	1006	
		Betoni	0,15	2,000	2400	1000	
Parvekelaatta	3,51	Betoni	0,23	2,000	2400	1000	Materiaalien paksuus ja tyyppi: Arvio Materiaalien ominaisuudet: RakMK C4 2012
Parveke-lasituksen runko-rakenne	5,79	Ruostumaton teräs	0,07	25,000	7900	480	Materiaalien paksuus ja tyyppi: Arvio Materiaalien ominaisuudet: RakMK C4 2012
Väliovi	0,74	Vaneri	0,006	0,170	700	1600	Materiaalien paksuus ja tyyppi: Arvio Materiaalien ominaisuudet: RakMK C4 2012
		Ilma	0,028	0,025	1,23	1008	
		Vaneri	0,006	0,170	700	1600	
Ikkuna	1,40	Lasi (MSE-ikkuna g-arvo: 0,54 Sälekaihtimet uloimpien lasien välissä)					YMa 176/2013 taulukkoarvo

1.2.2 Kylmäsilat

Kylmäsilta	Lämmönjohtavuus	Lähde
	W/(mK)	
Ulkoseinä-yläpohja	0,08	Arvio (YMa 1010/2017 12§)
Ulkoseinä-välipohja	0,00	Arvio (YMa 1010/2017 12§)
Ulkoseinä-ulkoseinä (ulkonurkka)	0,06	Arvio (YMa 1010/2017 12§)
Ulkoseinä-ulkoseinä (sisänurkka)	-0,06	Arvio (YMa 1010/2017 12§)
Ulkoseinä-ikkuna	0,04	Arvio (YMa 1010/2017 12§)
Ulkoseinä-ovi	0,04	Arvio (YMa 1010/2017 12§)

1.3 Ilmanvaihtojärjestelmä

1.3.1 Ilmanvaihtokone

Ilmanvaihtojärjestelmä	Yksikkö	Arvo	Lähde
Tyyppi	-	Asuntokohtainen tulo- ja poistoilmanvaihtojärjestelmä	Ilmanvaihtosuunnitelmat
Jälkilämmitys	-	Sähköpatteri	Ilmanvaihtosuunnitelmat
LTO:n lämpötilahyötysuhde	%	60	Arvio
LTO:n jäätymisenesto	°C	5	Arvio
Tuloilman asetusarvo	°C	18	Arvio
Lämpötilanousu puhaltimessa	°C	0	Arvio
Käyntiaika	h	00:00-24:00	Arvio
Tuloilmavirta	dm ³ /s	104	Ilmanvaihtosuunnitelmat
Poistoilmavirta	dm ³ /s	114	Ilmanvaihtosuunnitelmat
SFP-luku	kW/(m ³ /s)	2,39	Arvio

1.3.2 Ilmamäärät

Vyöhyke	Pinta-ala	Tuloilma	Poistoilma	Lähde
	m²	dm³/s	dm³/s	
B26 MH	10,4	10	0	Piirustus LVI-303-A
B26 MH-1	9,9	12	0	Piirustus LVI-303-A
B26 MH-2	12,3	12	0	Piirustus LVI-303-A
B26 OH+K+(RT)+ET	53,5	12	17	Piirustus LVI-303-A
B26 PH	6,1	0	17	Piirustus LVI-303-A
B26 S	2,9	6	6	Piirustus LVI-303-A
B26 WC	2,4	0	14	Piirustus LVI-303-A
B26 VH	3,7	0	3	Piirustus LVI-303-A

B31 MH	12,3	10	0	Piirustus LVI-304-A
B31 MH-1	10,4	12	0	Piirustus LVI-304-A
B31 MH-2	9,8	12	0	Piirustus LVI-304-A
B31 OH+K+(RT)+ET	54,0	12	17	Piirustus LVI-304-A
B31 PH	6,5	0	17	Piirustus LVI-304-A
B31 S	3,1	6	6	Piirustus LVI-304-A
B31 WC	2,4	0	14	Piirustus LVI-304-A
B31 VH	3,7	0	3	Piirustus LVI-304-A

1.4 Lämmitysjärjestelmä

Lämmitysjärjestelmä	Yksikkö	Arvo	Lähde
Tuotannon tyyppi	-	Kaukolämpö	SRV Rakennus Oy
Menolämpötilan säätö	-	Ulkolämpötilan mukaan	SRV Rakennus Oy
Tuotannon hyötysuhde	%	97	Arvio
Lämmitysteho	kW	8 (LKV pois lukien)	Simuloitu ja lukittu (IDA ICE)
Kiertovesipumpun tyyppi	-	Tarpeenmukainen	Arvio
Kiertovesipumpun massavirta (maks.)	kg/s	0,06	Simuloitu ja lukittu (IDA ICE)
Lämpimän käyttöveden kulutus	kWh/m ²	35	Arvio
Lämpimän käyttöveden kulutusprofiili	-	Standardin SFS-EN 15316-3-1:2007 mukaan (1PAX)	

1.5 Sisäiset kuormat ja käyttöprofiilit

Vyöhyke	Ihmiset (1,2 MET)	Aikataulu (arkisin, la, su)	Lait- teet	Aikataulu (arkisin, la, su)	Valais- tus	Aikataulu (arkisin, la, su)	Lähde
	kpl	Kerroin x [aika]	W/m ²	Kerroin x [aika]	W/m ²	Kerroin x [aika]	
B26 MH	1,0	0 [8-22], muuten 1 0 [8-22], muuten 1 0 [8-22], muuten 1	0		8	1 [6-7, 22-23], muuten 0 1 [7-8, 22-23], muuten 0 1 [7-8, 22-23], muuten 0	(Ehdotus lähes nolla-energiarakentamisen laskennan lähtötiedoiksi 2014)
B26 MH-1	1,0	0 [8-22], muuten 1 0 [8-22], muuten 1 0 [8-22], muuten 1	0		8	1 [6-7, 22-23], muuten 0 1 [7-8, 22-23], muuten 0 1 [7-8, 22-23], muuten 0	(Ehdotus lähes nolla-energiarakentamisen laskennan lähtötiedoiksi 2014)
B26 MH-2	1,0	0 [8-22], muuten 1 0 [8-22], muuten 1 0 [8-22], muuten 1	0		8	1 [6-7, 22-23], muuten 0 1 [7-8, 22-23], muuten 0 1 [7-8, 22-23], muuten 0	(Ehdotus lähes nolla-energiarakentamisen laskennan lähtötiedoiksi 2014)
B26 OH+K+(RT)+ET	4,0	1 [6-8, 18-22], muuten 0 1.0 [8-9, 18-22], muuten 0 1.0 [8-9, 18-22], muuten 0	14	1 [7-8, 18-22], muuten 0 1 [9-10, 18-22], muuten 0 1 [9-10, 18-22], muuten 0	8	1 [7-8, 18-22], muuten 0 1.0 [8-9, 18-22], muuten 0 1.0 [8-9, 18-22], muuten 0	(Ehdotus lähes nolla-energiarakentamisen laskennan lähtötiedoiksi 2014)

B31 MH	1,0	0 [8-22], muuten 1 0 [8-22], muuten 1 0 [8-22], muuten 1	0	8	1 [6-7, 22-23], muuten 0 1 [7-8, 22-23], muuten 0 1 [7-8, 22-23], muuten 0	(Ehdotus lähes nolla-energiarakentamisen laskennan lähtötiedoiksi 2014)	
B31 MH-1	1,0	0 [8-22], muuten 1 0 [8-22], muuten 1 0 [8-22], muuten 1	0	8	1 [6-7, 22-23], muuten 0 1 [7-8, 22-23], muuten 0 1 [7-8, 22-23], muuten 0	(Ehdotus lähes nolla-energiarakentamisen laskennan lähtötiedoiksi 2014)	
B31 MH-2	1,0	0 [8-22], muuten 1 0 [8-22], muuten 1 0 [8-22], muuten 1	0	8	1 [6-7, 22-23], muuten 0 1 [7-8, 22-23], muuten 0 1 [7-8, 22-23], muuten 0	(Ehdotus lähes nolla-energiarakentamisen laskennan lähtötiedoiksi 2014)	
B31 OH+K+(RT)+ET	4,0	1 [6-8, 18-22], muuten 0 1.0 [8-9, 18-22], muuten 0 1.0 [8-9, 18-22], muuten 0	14	1 [7-8, 18-22], muuten 0 1 [9-10, 18-22], muuten 0 1 [9-10, 18-22], muuten 0	8	1 [7-8, 18-22], muuten 0 1.0 [8-9, 18-22], muuten 0 1.0 [8-9, 18-22], muuten 0	(Ehdotus lähes nolla-energiarakentamisen laskennan lähtötiedoiksi 2014)



Kysely REINO-hankkeessa testauksessa mukana oleville asukkaille

Osallistuit(te) kysyntäjoustop testaukseen Aalto-yliopiston REINO-hankkeeseen liittyen. Nyt haluamme kysyä ensimmäiset kokemukset ja palautteet sekä testaukseen että kysyntäjoustopon yleisesti liittyen. Lyhyenä kertauksena kysyntäjoustopolla tarkoitetaan energiankäytön siirtämistä korkean kulutuksen tunneilta edullisempaan ajankohtaan tai käytön hetkellistä muuttamista tehotasapainon hallinnan tarpeisiin. Tällä voidaan mahdollisesti jättää saastuttava huippuvoimalaitos käynnistämättä. Myös uusiutuvan energiantuotannon lisäys kasvattaa tarvetta energiajärjestelmän joustavuudelle.

Vastaajan sukupuoli *

- ☐ Nainen
- ☐ Mies

Vastaajan ikä *

- ☐ 15-24 vuotta
- ☐ 25-34 vuotta
- ☐ 35-49 vuotta
- ☐ 50-64 vuotta
- ☐ 65-79 vuotta
- ☐ Yli 80 vuotta

Paikkakunta *

- ☐ Helsinki
- ☐ Lahti
- ☐ Hämeenlinna

Ammatti tai asema *

Vaihtoehdot:

- *Työntekijä*
- *Toimihenkilö/asiantuntija*
- *Yrittäjä*
- *Johtava asema*
- *Kotiäiti/-isä*
- *Opiskelija*
- *Eläkeläinen*
- *Työtön*
- *En halua vastata*

Mihin näistä ryhmistä taloutenne kuuluu? *

- ☐ Sinkkotalous
- ☐ Aikuistalous (vain yli 18-vuotiaita)
- ☐ Talous, jossa lapsia

Minkä perusteella voisit sallia asuntosi sähkö- ja lämmityslaitteiden etäohjauksen energiajärjestelmien optimoimiseksi: (voit valita useita) *

- ☐ Rahallinen korvaus
- ☐ Ympäristön hyvinvointi
- ☐ Sinulla olisi mahdollisuus hallita asuntosi sähkö- ja lämmityslaitteita myös itse (esimerkiksi asettaa aikatauluja, hallita laitteita etänä)
- ☐ En sallisi
- ☐ Jokin muu

Mikäli asuntosi olisi varustettu energianhallintajärjestelmällä, jonka kautta asunnon sähkö- ja lämmityslaitteita voisi ohjata, käyttäisitkö sitä mieluiten: *

- ☐ Älypuhelimien kautta
- ☐ Erillisen käyttöpaneelin kautta
- ☐ Jokin muu

Olisitko valmis laskemaan asuntosi sisälämpötilaa talvella hetkellisesti (esimerkiksi 1 °C:lla) energiajärjestelmän optimoimiseksi? *

- ☐ Kyllä
- ☐ Ei

Olisitko valmis vähentämään valaistuksen tehoa hetkellisesti korkean sähkönhinnan aikaan? *

- ☐ Kyllä
- ☐ Ei

Olisitko valmis siirtämään saunomista esim. tuntia myöhemmäksi sähkön ollessa kallista? *

- ☐ Kyllä
- ☐ Ei

Olisitko valmis käyttämään pyykinpesukoneen ja astianpesukoneen ajastusta siirtääksesi koneiden käytön edullisempaan sähkönhinnan aikaan? *

- ☐ Kyllä
- ☐ Ei

Mikä sai osallistumaan tähän tutkimukseen? *

- ☐ Mahdollisuus säästää sähkölaskussa
- ☐ Mahdollisuus kokeilla uusinta tekniikkaa
- ☐ Jokin muu syy

Mitä mieltä olet uudesta valaistuksenohjausjärjestelmästä? *

- ☐ Hyvä ja näppärä, helpottaa arkea
- ☐ Ihan ok, mutta pärjäisin ilmankin
- ☐ En ole tyytyväinen

Miten olet kokenut sovelluksen käytön? *

- ☐ Helppo käyttää ja selkeä sovellus
- ☐ Sovellus voisi olla selkeämpi, mutta olen oppinut käyttämään

- ☐ Sekava sovellus ja vaikea käyttää
- ☐ Jokin muu

Miten olet kokenut huoneiden lämpötilat uuden säätömahdollisuuden jälkeen? *

- ☐ Lämpötila on ollut tasaisempi
- ☐ En ole huomannut muutosta
- ☐ Lämpötila on vaihdellut (haluamattani)
- ☐ Jokin muu

Mitä muita kommentteja tai palautetta haluat antaa tutkimukseen tai laitteisiin liittyen? Voit myös tarkentaa edellä valitsemiasi "Jokin muu" -vaihtoehtoon vastauksia.



Kiitos vastauksistasi!