KYSYNTÄJOUSTO OSANA SUUNNITTELUPROSESSIA

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Sähkötekniikan diplomityö

2025

Henrik Tenhunen

Tarkastajat: Professori Samuli Honkapuro

Tutkijaopettaja Juha Haakana

Ohjaaja: Diplomi-insinööri Santeri Siren

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUTin energiajärjestelmien tiedekunta

Sähkötekniikka

Henrik Tenhunen

KYSYNTÄJOUSTO OSANA SUUNNITTELUPROSESSIA

Sähkötekniikan diplomityö

2025

65 sivua, 24 kuvaa, 6 taulukkoa ja 1 liite

Tarkastajat: Professori Samuli Honkapuro ja tutkijaopettaja Juha Haakana

Avainsanat: kysyntäjousto, suunnitteluprosessi, sähkökattila, reservimarkkina

Tämä diplomityö on tehty Ramboll Finland Oy:lle ja sen tarkoituksena on selvittää kysyntäjouston suunnittelun nykytila, sekä kehittää kysyntäjouston suunnitteluprosessia. Työssä otetaan tarkasteluun myös konkreettinen case-kohde, jonka avulla havainnollistetaan kysyntäjouston mahdollisuuksia rakennushankkeissa. Työn teoriaosuudessa käydään läpi reservimarkkinoiden toimintaa, kysyntäjoustoa terminä, sen toteutusta ja siihen liittyvää laitteistoa, kysyntäjouston suunnitteluprosessin kehittämisen pohjaksi.

Case-tutkimuksessa määritetään Helsingissä sijaitsevan rakennuskohteen lämmitysjärjestelmän kysyntäjoustopotentiaali. Tutkimuksessa simuloidaan rakennukseen lämpöpumpun tukilämmityksenä toimivan sähkökattilan liittämistä reservimarkkinoille ja järjestelmän kannattavuutta mallinnetaan vertaamalla sitä vaihtoehtoisiin lämmitysratkaisuihin. Simuloinnin tuloksena saadaan FCR-D ylös- ja alassäätömarkkinoiden kysyntäjoustoprofiilit Fingridin avointa dataa hyödyntämällä ja kustannusmallinnuksen avulla verrataan FCR-D- ja aFRR-markkinoiden kannattavuutta. FCR-D- ja aFRR-markkinat ovat tutkimuksen perusteella parhaat vaihtoehdot sähkökattilan liittämiseen kysyntäjoustomarkkinoille, sillä niillä voidaan osallistua alassäätö-markkinoille ja markkinoilla olevat sähkökattilat pystyvät osallistumaan näille markkinapaikoille. aFRR-markkina tarjoaa laskennallisesti korkeampaa tuottoa kuin FCR-D markkina, mutta sitä ei voi Fingridin avoimen datan perusteella mallintaa yhtä tarkasti kuin FCR-D markkinaa. Case-tutkimuksen lopputuloksena reservimarkkinoille osallistuminen on kannattavaa case-tutkimuksen kaltaisille rakennuskohteille.

Suunnitteluprosessin kehittämistä varten tehty kyselytutkimus avaa kysyntäjoustosuunnittelun nykytilaa ja sen tulosten pohjalta laaditaan kehityssuunnitelma. Kyselytutkimuksen ja teoriaosuuden perusteella selviää, että kysyntäjouston huomioimiseksi sähkösuunnittelussa on puutteelliset vaatimukset ja tärkein kehityskohde on lisätä vaatimus kysyntäjouston huomioimisesta projektin suunnitteluohjeeseen.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

LUT School of Energy Systems

Electrical Engineering

Henrik Tenhunen

DEMAND RESPONSE AS A PART OF DESIGN PROCESS

Master's thesis

2025

65 pages, 24 figures, 6 tables and 1 appendix

Examiners: Professor Samuli Honkapuro and teacher-reseacher Juha Haakana

Keywords: demand response, design process, electric boiler, reserve markets

This thesis was made for Ramboll Finland Oy, and its purpose was to investigate the current state of demand response planning and to develop the demand response planning process. The thesis also includes a case study, which illustrates the possibilities of demand response in construction projects. The theoretical part of the work covers the basics of reserve markets, demand response as a term, its implementation and related systems, to provide a basis for the development of the demand response planning process.

The case study defines the demand response potential of a heating system in a building located in Helsinki. The study simulates connecting an ground heat supporting electric boiler to reserve markets and the profitability of the system is modeled by comparing it to alternative heating solutions. The simulation result provides demand response profiles for the FCR-D up- and down-regulation markets by utilizing Fingrid's open data, and cost modeling is used to compare the profitability of the FCR-D and aFRR markets. According to the study, the FCR-D and aFRR markets are the best options for using the electric boiler in demand response, as they allow participation in the down-regulation markets and the electric boilers available on the market can participate in these marketplaces. The aFRR market offers a theoretically higher return than the FCR-D market, but it cannot be modeled as accurately as the FCR-D market based on Fingrid's open data. The outcome of the case-study indicates that participation in reserve markets is profitable for building projects like the one studied.

A survey conducted for the planning process is used to analyze the current state of demand response planning and as a part of the design process and a development plan for the design process is created based on the results. The survey and the theoretical study reveal that the requirements for demand response planning in electrical design process are inadequate, and the most important area for improvement is to add a requirement to consider demand response in the project planning guidelines.

KIITOKSET/ ACKNOWLEDGEMENTS

Haluan kiittää LUT-yliopiston professori Samuli Honkapuroa työn hyvästä ohjauksesta ja tuesta. Yhteistyö sujui mielestäni todella hyvin ja kysymyksiin sai aina hyvän vastauksen.

Lisäksi haluan kiittää työnantajaani ja tämän diplomityön teettäjää Ramboll Finland Oy:ta diplomityön tekemisen mahdollistamisesta, sekä työn ohjaajaa Santeri Sireniä ammattimaisesta ohjauksesta.

Lopuksi haluan kiittää isääni, joka kannusti työn alusta loppuun saakka ja oli tukena eri käänteissä.

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Lyhenteet

aFRR – Automaattinen taajuuden palautusreservi (Automatic Frequency Restoration Reserve)

FCR-D – Taajuusohjattu häiriöreservi (Frequency Containment Reserve for Disturbances)

FCR-N – Taajuusohjattu käyttöreservi (Frequency Containment Reserve for Normal Operation)

FFR – Nopea taajuusreservi (Fast Frequency Reserve)

mFRR – Säätösähkö- ja säätökapasiteettimarkkinat (Manual Frequency Restoration Reserve)

MW – Megawatti

TWh – Terawattitunti

V2G – Vehicle to grid

VAK – valvonta-alakeskus

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

(Kiitokset)

(Symboli- ja lyhenneluettelo)

1 Johdanto 8
1.1 Työn taustaa 8
1.2 Työn tavoitteet ja rakenne 9
2 Suomen sähköjärjestelmän nykytila ja kehitystrendit 10
3 Kysyntäjousto käsitteenä 13
3.1 Implisiittinen kysyntäjousto 14
3.2 Eksplisiittinen kysyntäjousto 14
3.3 Kysyntäjouston tarve tulevaisuudessa 15
3.4 Rakennusten älyindikaattori 16
3.5 Aggregointi 17
4 Kysyntäjouston markkinapaikat 19
4.1 Vuorokausimarkkina (Elspot) ja päivänsisäinen markkina (Elbas) 19
4.2 Reservimarkkinat 20
4.2.1 Nopea taajuusreservi (FFR) 21
4.2.2 Taajuusohjattu käyttö- ja häiriöreservi 21
4.2.3 Säätösähkö- ja kapasiteettimarkkinat (mFRR) 23
4.2.4 Automaattinen taajuuden palautusreservi (aFRR) 24
4.2.5 Reservituotteiden kaupankäyntialustat 25
4.2.6 Reservituotteiden tiedonvaihto ja reaaliaikaraportointi 25
4.2.7 Kysyntäjouston reservituotteen hyväksyttämisprosessi 26
4.2.8 Säätökokeet ja sopimusvaatimukset 27
4.2.9 Reservimarkkinoiden kapasiteettikorvausten kehitys 28
5 Taseselvitys 29
6 Kysyntäjouston tekninen toteutus ja kehitystrendit 31
6.1 Älymittarit ja dynaaminen kuormanhallinta 31

6.2 Ohjattavat resurssit....33
6.2.1 Ilmanvaihto....33
6.2.2 Kylmäkoneet....34
6.2.3 UPS- ja varavoimajärjestelmät....34
6.2.4 Sähköautojen lataus....35
6.2.5 Akkuvarastot....35
6.2.6 Valaistus....36
6.2.7 Lämpöpumput....37
6.2.8 Sähkölämmitys....37
6.3 Kysyntäjouston toimintojen priorisointi....39
7 Kyselytutkimus kiinteistöjen kysyntyäjoustosuunnuttelun nykytilasta....40
7.1 Kyselytutkimus....40
7.2 Tutkimusprosessi....40
8 Kiinteistön kysyntäjouston suunnitteluprosessin kehittäminen....43
8.1 Rakennusten suunnittelun vaiheet....43
8.2 Suunnitteluratkaisujen kehittäminen....44
9 Case-tutkimus: Lämpöpumppujärjestelmän tukilämmitysmuotona toimivan sähkökattilan tuotteistaminen kysyntäjoustoon....48
9.1 Case-kohteen tiedot....48
9.2 Sähkökattilat....49
9.3 Python laskentatyökalut....50
9.4 Lämpöpumput, joilla tukilämmityksenä toimiva sähkökattila reservimarkkinoilla 52
9.5 Elinkaarilaskenta case-skenaarioille....54
9.5.1 Sähkökattila FCR-D alassäätömarkkinalla....54
9.5.2 Sähkökattila aFRR-alassäätömarkkinalla....56
9.5.3 Sähkökattila FFR, mFRR ja aFRR markkinoilla....57
10 Johtopäätökset....59
10.1 Pohdintaa ja kehitysideoita....60
Lähteet....61

Liitteet

Liite 1. Kustannuslaskennan lähtötiedot

1 Johdanto

1.1 Työn taustaa

Maailmalla on käynnissä globaali energiamurros. Sähkönkulutus kasvaa jatkuvasti, kun fossiilisia polttoaineita korvataan hiilineutraaleilla vaihtoehdoilla ja tämä vaatii mittavia energiajärjestelmien ja infrastruktuurin muutoksia. Tiedeyhteisö on jo pitkään vaatinut hiilidioksidipäästöjen hillitsemistä maailman hallituksilta. Jotta Pariisin ilmastosopimuksessa päätettyyn 1.5 asteen ilmaston lämpenemisen rajaan olisi mahdollista päästä, tulee hiilidioksidipäästöjä vähentää 48 % vuoteen 2030 mennessä verrattuna vuoden 2019 päästöihin (IPCC, 2023). EU ajaa kunnianhimoista ilmastopolitiikkaa, jonka tavoitteena on pudottaa päästöjä 55 % vuoteen 2030 mennessä ja jäsenmaiden kesken on sovittu, että 30 % EU:n varoista keskitetään ilmastonmuutoksen torjumiseen liittyviin projekteihin vuoteen 2027 asti. (EU-neuvosto, 2024)

Euroopassa yksi tärkeä osa energiajärjestelmän muutosta on energiaomavaraisuuden lisääminen. Ukrainan sota aiheutti suuria kustannuksia venäjän fossiilisesta kaasusta riippuvaisille EU-jäsenmaille, ja Venäjälle asetettujen pakotteiden myötä jäsenmaat ovat lähteneet investoimaan uusiutuvaan energiaan suurella volyymilla. Suomessa uusiutuvaa energiaa on otettu käyttöön kiihtyvään tahtiin ja uusiutuvien energiamuotojen osuus kokonaiskulutuksesta oli 42 % vuonna 2023 (Motiva, 2024).

Tuuli- ja aurinkovoima ovat sääriippuvaisia ja niiden tuotantokapasiteetti vaihteleekin suuresti vallitsevien sääolosuhteiden myötä. Sähköverkossa tuotannon ja kulutuksen on pysyttävä koko ajan tasapainossa ja tätä tasapainoa on Suomessa perinteisesti pidetty yllä lauhde- ja vesivoimalla. Lauhdevoima Suomessa muodostuu pääasiallisesti ydinvoimasta, joka syöttää verkkoon tasaisesti vuorokauden ympäri, kun taas vesivoimalla pystytään reagoimaan nopeasti tuotantotarpeisiin.

Kulutuksen ja tuotannon tasapainoa voidaan säätää myös kulutusta säätämällä. Tätä kutsutaan kuormitus- eli kysyntäjoustoksi. Kysyntäjousto nousee esiin yhä useammin erityisesti rakennus- ja saneerausprojekteissa, joissa pyritään parantamaan rakennusten energiatehokkuutta ja pienentämään niiden hiilijalanjälkeä. Tulevaisuudessa on tärkeää, että rakennusten suunnittelijat tuntevat kysyntäjoustoon liittyvän laitteisto- ja ohjelmistokokonaisuuden, jotta yritykset

pystyvät tarjoamaan asiakkailleen oikeanlaisia ratkaisuja ja pystyvät kilpailemaan markkinoilla.

1.2 Työn tavoitteet ja rakenne

Tämän työn tarkoituksena on edistää kysyntäjouston toteutusta Rambollilla kartoittamalla kysyntäjouston tekniset reunaehdot ja esittämällä selkeät suunnitteluvaiheet kysyntäjouston toteutukselle. Työn osana tehdään case-tutkimus Rambollin rakennuskohteen lämmitysjärjestelmästä, josta saadaan käytännön esimerkki kysyntäjouston toteutuksesta. Tämä työ keskittyy seuraaviin tutkimuskysymyksiin

- Mitkä ovat kysyntäjouston tämänhetkiset tekniset reunaehdot?
- Mikä on kysyntäjoustoon liittyvän laitteiston nykytila ja kehitystrendit
- Miten kysyntäjousto tulee huomioida suunnitteluprosessissa
- Miten kysyntäjousto tulee huomioida rakennusten suunnitteluprosessissa
- Lämpöpumppu-lämmitysjärjestelmän tukilämmityksenä toimivan sähkökattilan liittäminen reservimarkkinoille

Tämä diplomityö muodostuu lukujen 1.–7. teoreettisesta osuudesta, 8. luvun suunnitteluprosessin kehittämisestä ja 9. luvun case-tutkimuksesta. Teoreettisessa osuudessa käydään läpi Suomen sähköverkon nykytilaa ja kehitystrendejä, sähköreservimarkkinoiden toimintaa, kysyntäjoustoon liittyvän laitteiston nykytilaa ja kehitystrendejä, alaa koskevia standardeja, sekä hakemus- ja lupaprosesseja

Case-tutkimuksessa tutkitaan lämpöpumppu-lämmitysjärjestelmän tukilämmityksenä toimivan sähkökattilan liittämistä reservimarkkinoille suuressa kerrostalokohteessa. Tutkimuksessa vertaillaan markkinapaikkojen kannattavuutta, simuloidaan kattilan toimintaa markkinoilla ja tehdään kustannusanalyysi.

Käytännön osuuden tarkoituksena tuoda esiin kehityskohteita nykytilanteeseen verrattuna, jotta kysyntäjouston huomioiminen saadaan osaksi rakennushankkeita.

2 Suomen sähköjärjestelmän nykytila ja kehitystrendit

Suomen kantaverkkoyhtiö on Fingrid ja se vastaa kantaverkossa tapahtuvasta sähkönsiirrosta. Kantaverkko muodostuu 400 kV, 200 kV ja 110 kV siirtolinjoista. Kantaverkkoyhtiön verkkoon voivat liittyä suurjännitteiset asiakkaat, kuten sähköntuotantolaitokset, teollisuus ja suuret liiketilat. (Fingrid, 2024a)

Jakeluverkkoyhtiöt vastaavat niille kuuluvien alueiden sähkönsiirrosta ja niiden jakeluverkot toimivat 110 kV suurjännitteellä, 20 kV ja 10 kV keskijännitteellä, sekä 1 kV ja 0,4 kV pienjännitteellä. Alueverkkoyhtiöiden suurjännitelinjoihin voi kantaverkon tapaan liittyä suurjänniteasiakkaita, kuten tuotantolaitoksia, teollisuutta. (Fingrid, 2024a)

Suomi toimii myös osana pohjoismaista synkronialuetta, jonka muut osapuolet ovat Ruotsi, Norja ja Itä-Tanska. Synkronialueen sähköverkot ovat yhteydessä toisiinsa vaihtosähköyhteyksillä. Tasasähköyhteyksiä taas käytetään synkronialueiden välisessä sähkönsiirrossa, joita ovat esimerkiksi Estlink1 ja Estlink2 väliset yhteydet. (Fingrid, 2024b) Tasasähköyhteyksiä voidaan myös hyödyntää synkronialueiden sisällä, jos se on teknistaloudellisesti kannattavaa (Fingrid, 2024b).

Suomen sähkönkulutuksen ennustetaan kasvavan rajusti seuraavan 10 vuoden aikana. Fingridin Q3/2024 raportissa olevan ennusteen mukaan vuonna 2030 Suomessa sähkön tuotantokapasiteetti, sekä sähkön kulutus voivat olla jopa 50 % suuremmat kuin tänä päivänä ja vuonna 2035 jopa kaksinkertaiset nykypäivään verrattuna. (Fingrid, 2024c) Taulukossa 1 on esitetty Fingridin suunnitteluskenaarion mukaiset sähköntuotantomuotojen osuudet ja niiden kehitys seuraavan 10 vuoden aikana. Sähköntuotannon kasvun odotetaan muodostuvan pääasiallisesti uusiutuvasta energiasta, kun taas muuta perinteisesti fossiilista energiantuotantoa ajetaan alas.

Taulukko 1. Fingridin suunnitteluskenaarion sähköntuotantomuotojen osuudet (Fingrid, 2024d)

Verkon suunnitteluskenaario

Sähkön tuotanto (TWh)	**2025**	**2030**	**2035**
Tuulivoima	26	60	101
Aurinkovoima	2	10	16
Vesivoima	14	14	14
Muu lämpövoima	16	13	10
Ydinvoima	33	34	34
Kokonaistuotanto	90	131	175
Kulutus	88	126	159

Fingridin Q3/2024 raportin mukaan Suomessa on tiedossa yli 35 gigawatin edestä sähköintensiivisiä teollisuushankkeita ja uusiutuvien energiantuotantomuotohankkeiden määrä on noin 400 gigawattia. Myös sähkövarastohankkeita on yli 10 gigawatin edestä. (Fingrid, 2024e). On kuitenkin huomioitava, että tiedot perustuvat liittymäkyselyihin ja on epätodennäköistä, että kaikki hankkeet toteutuvat. Taulukossa 2 on esitetty Fingridin verkon suunnitteluskenaarion mukaan sähkön kulutus sektoreittain.

Taulukko 2. Fingridin suunnitteluskenaarion mukaiset sähkönkulutusennusteet sektoreittain (Fingrid, 2024d)

Verkon suunnitteluskenaario

Sähkön kulutus sektoreittain (TWh)	**2025**	**2030**	**2035**
Teollisuus ja datakeskukset	40	69	101
Rakennusten lämmitys	20	25	25
Liikenne	2	3	5
Muu kulutus ja häviöt	27	28	29
Kokonaiskulutus	88	126	159

Suurin kulutuksen kasvu nähdään teollisuudessa ja datakeskuksissa, jotka ovat hyvin sähköintensiivisiä

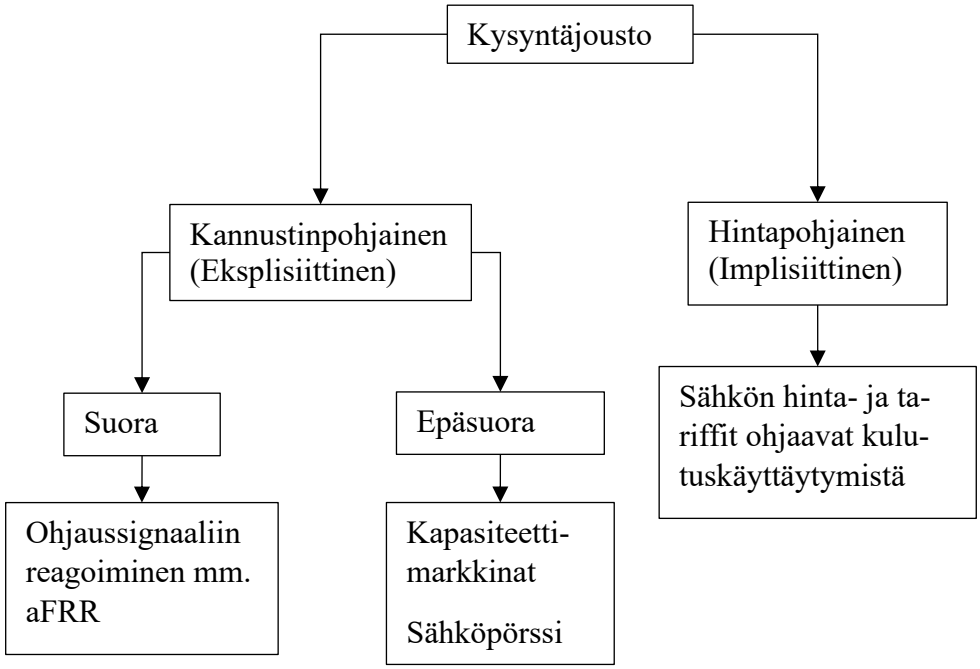
Tämän kasvun taustalla on esimerkiksi yhteiskunnan sähköistyminen, ja sähköintensiivisen teollisuuden lisääntyminen kovalla vauhdilla. Esimerkiksi 24.6.2024 julkaistun Ylen artikkelin mukaan Suomeen ollaan rakentamassa ja suunnittelemassa noin 20 uutta datakeskusta ja näistä yksi suurimmista on Kirkkonummelle suunniteltu Microsoftin datakeskus. Lisäksi Googlella on Haminassa suuri datakeskus, jota ollaan laajentamassa miljardibudjetilla. (Yle, 2024). Liikenteen sähköistymisen vaikutukset sähkön kokonaiskulutukseen jäävät ennusteen mukaan pieneksi. Ennusteessa on laskettu liikenteessä olevan n. 800 000–900 000 sähköllä ladattavaa henkilöautoa (Fingrid, 2024e).

3 Kysyntäjousto käsitteenä

Kysyntäjoustosta puhuttaessa menevät käsitteet DSM ja DR usein sekaisin. DSM on lyhenne kulutuspuolen hallinnasta, jonka laajemman kokonaisuuden osana kysyntäjousto on. DR on lyhenne sanasta demand response, joka tarkoittaa kysyntäjoustoa. Kulutuspuolen hallinta kattaa kysyntäjouston lisäksi esimerkiksi energiatehokkuuden lisäämisen. Kysyntäjoustolla tarkoitetaan sähkön käytön muuttamista hintakannustimiin perustuen. Tämä tarkoittaa esimerkiksi kulutuksen siirtämistä halvemmalle ajankohdalle tai kulutuksen vähentämistä tai lisäämistä sähköverkkoyhtiön ohjauspyyntöjen mukaisesti. (Stanelyte, Radziukyniene ja Radziukynas, 2022)

Kysyntäjouston tarve on lisääntynyt, kun vaihtelevien energiantuotantomuotojen määrä on lisääntynyt. Suomessa nopeasti lisääntyneet tuuli- ja aurinkovoima ovat sääriippuvaisia ja niiden tuotantokapasiteetti riippuu suuresti vallitsevista sääolosuhteista. Tämä aiheuttaa haasteita sähköverkon tehotasapainolle, sillä tuotannon ja kulutuksen on pysyttävä koko ajan tasapainossa. Sähköverkko on tasapainossa, kun verkon taajuus on 50 Hz 0,2 % tarkkuudella (Fingrid, 2025a).

Tätä tasapainoa on Suomessa perinteisesti pidetty yllä lauhde- ja vesivoimalla, sekä osallistuttamalla suuria kuluttajia reservimarkkinoille ja hintapohjaiseen kulutusjoustoon. Sähkön pienkuluttajien on vielä tällä hetkellä haastavaa osallistua reservimarkkinoille suurten tehovaatimusten takia, mutta hintapohjaiseen kysyntäjoustoon on mahdollistua osallistua esimerkiksi säätämällä sähkön kulutustottumuksia pörssisähkön hinnan mukaisesti. (Fingrid, 2025a) Kuvassa 1. on esitetty kulutusjouston eri osa-alueet.



Kuva 1. Kysyntäjouston osa-alueet

Kysyntäjousto jakaantuu kahteen osa-alueeseen, implisiittiseen ja eksplisiittiseen. Näiden erot käydään läpi seuraavissa luvuissa.

3.1 Implisiittinen kysyntäjousto

Implisiittinen kysyntäjousto tarkoittaa, että kuluttajia kannustetaan muuttamaan energiankulutustottumuksiaan hintasignaalien tai tariffien perusteella ilman suoraa viestintää energiayhtiöiltä tai ohjauspyyntöjä verkko-operaattorilta. (IEA, 2023). Kannustimia voivat olla esimerkiksi pörssisähkösopimus eli spot-sopimus, jossa sähkön hinta on suoraan riippuvainen verkon kuormitustasosta tai esimerkiksi tehotariffi, jossa asiakkaalta peritään tehomaksua.

3.2 Eksplisiittinen kysyntäjousto

Eksplisiittinen kysyntäjousto tarkoittaa kysyntäjouston toteuttamista aktiivisesti kannustinpohjaisesti ja sillä pystytäänkin vastaamaan tarkasti joustoa tarvitseviin tilanteisiin, kuten verkon taajuuspoikkeamiin. Kysyntäjoustosta maksetaan tällöin asiakkaalle suora korvaus ja jouston määrästä tehdään asiakkaan ja verkko-operaattorin välinen sopimus. (IEA, 2023). Eksplisiittinen kysyntäjousto voi olla joko ylös tai alas säätöä.

Eksplisiittinen kysyntäjousto voi tapahtua suoraan, jolloin sähköverkko-operaattori lähettää aktivointisignaalin asiakkaalle ja sopimuksen puitteissa asiakkaan kysyntäjoustoon kykenevä laitteisto vastaa signaaliin. Epäsuorassa joustossa asiakas osallistuu esimerkiksi kapasiteettimarkkinoille tai sähköpörssiin ja sopii toimittavan tietyn verran joustokapasiteettia sovittuna ajankohtana.

3.3 Kysyntäjouston tarve tulevaisuudessa

Kysyntäjouston tarve tulee kasvamaan tulevaisuudessa. Tällä hetkellä kysyntäjoustoa pidetään usein vain kulutuksen siirtämisenä toiseen ajankohtaan tai sen rajoittamisena, ja tulevaisuudessa voikin olla tarpeellista lisätä kulutusta ylituotantotilanteissa nykyistä enemmän. (Partanen et al., 2023)

Myös paikallinen omatuotannon hyödyntäminen tarvitsee kulutusjouston lisäämistä. Joustoresursseista voi hyötyä myös uudella tavalla aggregoinnin avulla. Aggregaattorin välityksellä on mahdollista tarjota kulutuksen joustoa markkinoille korvausta vastaan. Kuluttajapuolen kulutuksen jousto on riippuvainen kohteen järjestelmä- ja ohjausratkaisuista. (Partanen et al., 2023)

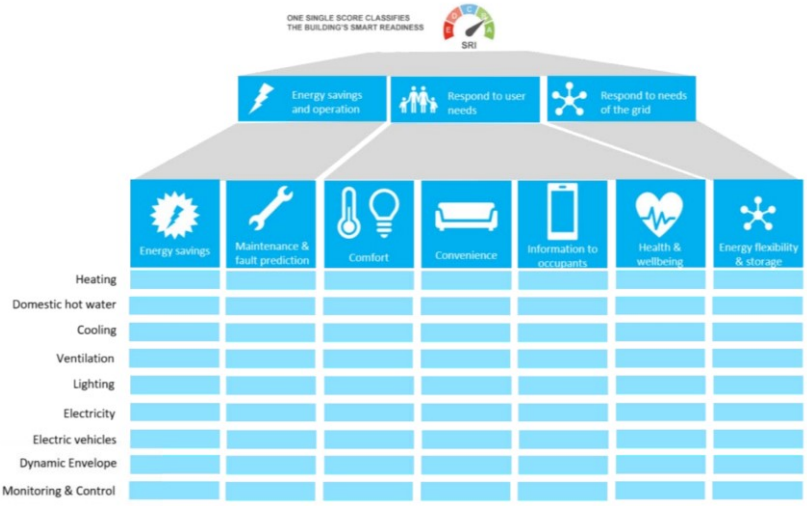
Kysyntäjousto vaikuttaa myös sähköjärjestelmän rakenteeseen. Yksittäisten kohteiden osalta kysyntäjousto vaikuttaa esimerkiksi liittymän kokoon, omatuotannon hyödyntämiseen, sekä alueen muuntopiirin mitoitukseen. Kysyntäjoustolla on vaikutus asiakkaiden sähkönkulutustottumuksiin ja tämä taas näkyy sähköyhtiöiden puolella ennustevirheinä siihen asti, että ennustejärjestelmä sopeutuu muutokseen. (Partanen et al., 2023) Markkinoille osallistumiseen tarvitaan tarpeeksi kokonaistehoa, joka joustomekanismista riippuen vaihtelee 0,1–1 MW:n välillä (Fingrid, 2024f). Pienempiä kohteita voidaan liittää markkinoille hyödyntämällä aggregointipalvelua.

Kysyntäjousto on mahdollista toteuttaa kiinteistön sisäisesti tai ulkoisen ohjaussignaalin perusteella. Kiinteistön sisäisellä jousto-ohjauksella pyritään ensisijaisesti vaikuttamaan sähköliittymän kokoon ja sitä voi olla esimerkiksi risteilykytkennät kuten kiuasristeily tai kiinteistöautomaatiojärjestelmän tekemä ohjaus. Ulkoista ohjausta voi olla esimerkiksi sähkön hintaan perustuva ohjainlaitteella tehtävä aikaohjaus tai ulkopuolisen palveluntarjoajan suorittama ohjaus joustotarpeen mukaisesti. (Partanen et al., 2023)

3.4 Rakennusten älyindikaattori

Rakennusten älyindikaattori (eng. Smart readiness indicator) on EU:n komission aloite, jonka tarkoituksena on luoda yhtenäinen tapa arvioida rakennusten älyvalmiuksia. Rakennusten älyindikaattorin avulla voidaan tarkastella rakennusten taloteknisten järjestelmien tasoa esimerkiksi energiatehokkuuden ja kysyntäjouston näkökulmasta. Yleiset vaatimukset tulevat EU:n taholta ja EU-maat koordinoivat toteutusta kansallisesti. Motiva on vastuussa kansallisesta toteutuksesta Suomessa (Motiva, 2025)

Älyindikaattorin laskentamenetelmässä rakennuksen valmiuksia tarkastellaan kolmella avainalueella, joista kukin vaikuttaa lopulliseen arvosanaan kolmannesosan painoarvolla. Esimerkki laskentaperiaatteesta on esitetty kuvassa 2.



Kuva 2. Älyindikaattorin laskentaperiaate (Ketomäki, 2022)

Ensimmäinen tarkasteltava alue on käyttäjä, eli rakennuksen kyky mukautua käyttäjän tarpeisiin. Toinen tarkasteltava alue on energia ja ylläpito, jossa huomioidaan järjestelmien energiatehokkuus ja ylläpidon vaivattomuus. Kolmas tarkasteltava alue on kysyntäjousto, joka mittaa rakennuksen sopeutumiskykyä ja kykyä vastata energian tuotannon vaihteluihin. Älyindikaattorin arvon laskennassa rakennuksen taloteknisten järjestelmien arviointi pilkotaan pienempiin osiin, joita arvioidaan yksitellen. (Ketomäki, 2022)

3.5 Aggregointi

Aggregointi tarkoittaa pienempien säätöön ja joustoon kykenevien sähkön tuotanto-, kulutus- sekä varastointikohteiden liittämistä suuremmiksi energiakokonaisuuksiksi. Sähkömarkkinalain (497/2023) mukaan aggregoinnilla tarkoitetaan toimintaa, jossa yhdistetään useiden loppukäyttäjien kulutusta tai tuottamaa sähköä myytäväksi, ostettavaksi tai huutokaupattavaksi sähkömarkkinoilla (Finlex, 2023). Esimerkiksi kiinteistöjen aurinkovoimalat, lämmitys ja jäähdytys sekä ilmastointi ja valaistus voivat suurempina kokonaisuuksina osallistua sähkön reservimarkkinapaikoille. Aggregaattori taas on markkinaosapuoli, joka mahdollistaa energiakokonaisuuden viemisen markkinoille yhtenä tuotteena. Itsenäinen aggregaattori eroa aggregaattorista siten, että se ei ole sidoksissa loppukäyttäjän avoimeen sähköntoimittajaan. (Fingrid, 2024f)

Tällä hetkellä aggregointi on Suomessa mahdollista kaikilla sähkömarkkinapaikoilla, jos kauppaa käydään taseketjun sisällä. Jos kyseessä on itsenäinen aggregointi, aggregaattori voi kerätä joustoresursseja tasevastuiden alueelta reservituotteen ehtojen mukaisesti (Soikkeli, 2022). Sallitut markkinapaikat ovat FFR, FCR-D ja FCR-N. FCR-D ja FFR markkinoille on 1 MW minimitarjouskoko ja FCR-N markkinoille pääsee osallistumaan 0,1 MW joustotarjouksella. (Fingrid, 2024f) Itsenäisen aggregointi on tärkeä osa sähköjärjestelmän joustavuuden ja resilienssin lisäämisessä.

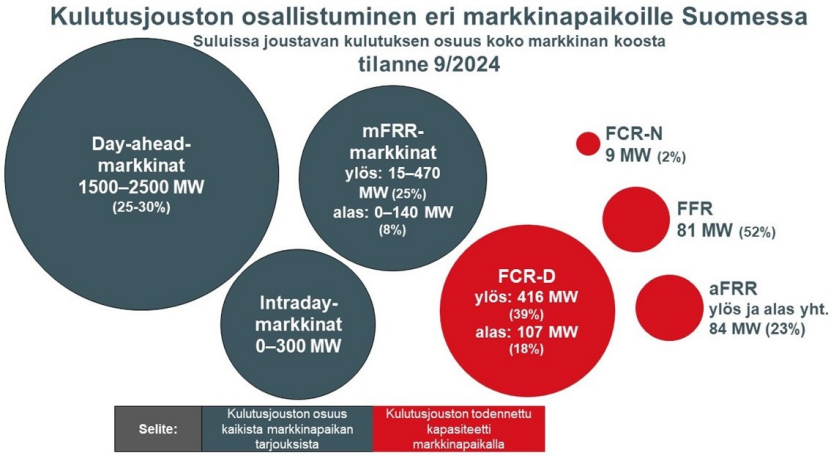
Loppukäyttäjän aggregointisopimuksen solmimiseen ei tarvita sähköntoimittajan tai verkonhaltija erillistä suostumusta. Sähkömarkkinalain mukaisesti itsenäisen aggregaattorin täytyy korvata aggregoinnista aiheutuneet kustannukset loppukäyttäjän avoimelle toimittajalle tai tasevastaavalle. Kustannukset korvataan vuorokausimarkkinalla, intraday-markkinalla tai tasehallintamarkkinalla. (Fingrid, 2024f)

Suomessa aggregointia on toteutettu jo useammassa hankkeessa. Esimerkiksi Siemensin tytäryhtiö Vibeco ja Elisa tarjoavat virtuaalivoimalaitospalvelua. Vibeco on ollut mukana Lappeenrannan kaupungin hankkeessa, jossa 17-kiinteistön ilmanvaihtokoneet liitettiin virtuaalivoimalaitos-palvelun kautta yhdeksi joustokohteeksi. LIDL on liittänyt 136 myymälää virtuaalivoimalaitospalveluun, Kauppakeskus Sello hyödyntää taloteknisiä ratkaisuja ja kykenee osallistumaan markkinoille (Vibeco, 2025), ja Elisa on oman DER-palvelunsa kautta liittänyt tukiasemien varavirtajärjestelmät virtuaalivoimapalvelun kautta reservimarkkinoille (Elisa, 2023).

Aggregointia tarjoavia yrityksiä ei Suomessa ole vielä montaa, sillä aihe on vielä uusi ja melko tuntematon, mutta keskustelu aiheesta ja erilaiset hankkeet ovat lisääntyneet.

4 Kysyntäjouston markkinapaikat

Kysyntäjoustolla pääsee Suomessa osallistumaan kaikille markkinapaikoille voimalaitosten tapaan. Markkinapaikat on esitetty kuvassa 3. Kuluttajille kohdistuu erilaisia vaatimuksia esimerkiksi jouston tehosta ja aktivointiajasta ja myös kysyntäjouston muoto vaihtelee implisiittisestä kulutuksen muuttamisesta eksplisiittiseen kulutuksen ohjaukseen.



Kuva 3. Kysyntäjouston markkinapaikat (Fingrid, 2024e)

Kysyntäjouston markkinapaikat jakautuvat päivänsisäisiin ja vuorokausimarkkinoihin, sekä reservimarkkinoihin. Seuraavissa luvuissa käydään läpi tarkemmin kysyntäjouston markkinapaikkojen toimintaa, sekä niiden vaatimuksia.

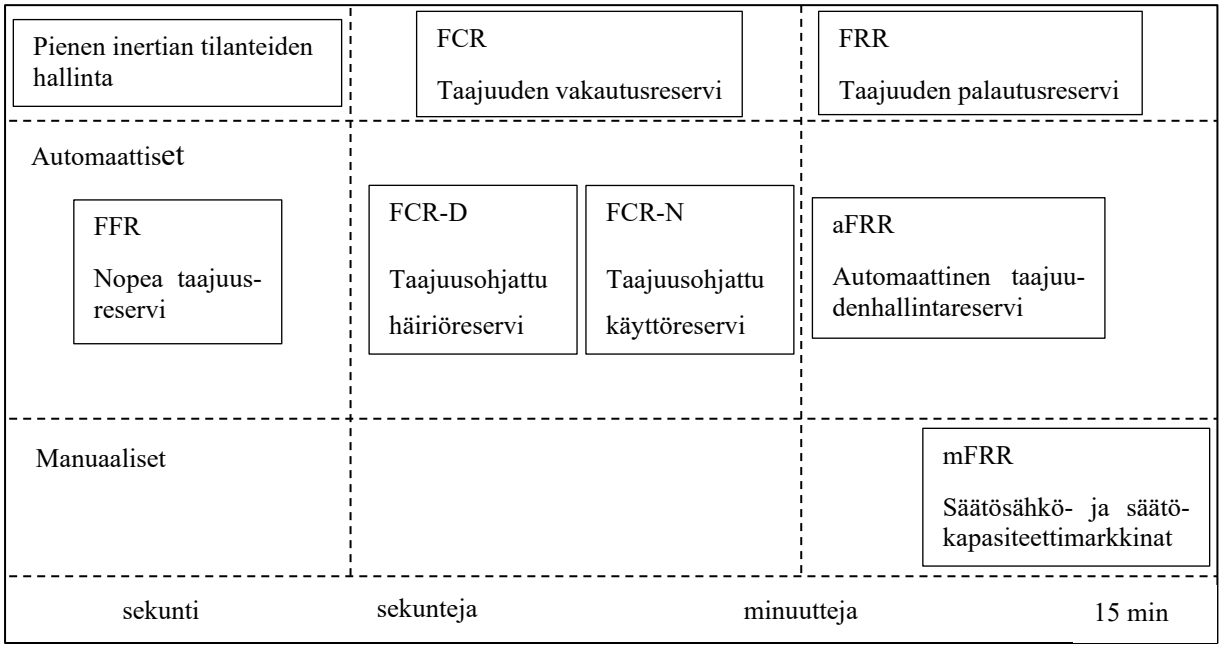
4.1 Vuorokausimarkkina (Elspot) ja päivänsisäinen markkina (Elbas)

Nord Pool Spot-sähköpörssi jakautuu kahteen kaupankäyntimekanismiin, vuorokausimarkkinaan sekä päivänsisäiseen markkinaan. Vuorokausimarkkina perustuu suljettuun kaupankäyntijärjestelmään, joka tarkoittaa sitä, että tarjouksen tekijät eivät tiedä muiden markkinaosapuolien tarjouksien suuruutta. Vuorokausimarkkinalla tarjoukset tehdään seuraavan päivän tunneille 0,1 MWh:n tarkkuudella. Kauppaa käydään seuraavan päivän aikana toimitettavilla fyysisillä sähkötuotteilla. Spot-markkinoilla kuluttajat voivat osallistua kysyntäjoustoon suoraan, esimerkiksi siirtämällä sähkönkäyttöään halvempiin tunteihin, kun sähkön hinta on alhainen. Tämä voi tapahtua joko suoraan markkinahintojen mukaan tai automaattisten kysyntäjoustoalgoritmien avulla.

Päivänsisäinen markkina on vuorokausimarkkinan jälkimarkkinapaikka, jossa kauppaa käydään jatkuvasti. Päivänsisäisellä markkinalla käydään kauppaa huomattavasti vähemmän ja sillä pyritäänkin vastamaan tuotannon ja kulutuksen yllättäviin muutoksiin ja tasaamaan oma sähkötase. Kauppaa voidaan käydä fyysisillä sähkötuotteilla, joita ei saatu vuorokausimarkkinalla myytyä. (Virtanen, 2020)

4.2 Reservimarkkinat

Koko valtion tasolla kysyntäjoustomarkkinat toimivat reservimarkkinoilla. Reservimarkkinoiden tehtävänä on tarjota riittävästi säätösähköä, jotta verkon taajuus saadaan pidettyä 50 Hz:n tasolla. Sähkömarkkinoilla molempien osapuolten intressinä on suunnitella tuotantonsa ja kulutuksena etukäteen, jotta sähköverkon 50 Hz:n tasapaino saavutetaan (Partanen et al., 2023). Tuntimarkkinoilla käyttötunnin aikaisten kulutuksen ja tuotannon poikkeamien tasapainotukseen käytetään reservejä, joita valtion verkkoyhtiö Fingrid hankkii reservimarkkinoilta (Fingrid, 2025b). Pohjoismaissa jokaisen valtion kantaverkkoyhtiö on vastuussa maakohtaisesta kapasiteetin hankinnasta, jotta pohjoismaiden yhteinen 600 MW reservimäärä toteutuu (Partanen et al., 2023). Suomen osuus pohjoismaiden taajuusohjatusta käyttöreservistä on 126 MW vuonna 2025. (Fingrid, 2025b) Reservimarkkinoilla on käytössä erilaisia tuotteita, joilla pyritään pitämään sähköverkko tasapainossa. Kuvassa 4. on esitetty reservimarkkinoiden tuotteet



Kuva 4. Reservimarkkinoilla olevat tuotteet (Fingrid, 2025b)

Seuraavissa luvuissa käydään tarkemmin läpi reservimarkkinoiden tuotteiden ominaisuudet ja vaatimukset.

4.2.1 Nopea taajuusreservi (FFR)

FFR on uusi, vuonna 2020 Pohjoismaissa käyttöönotettu nopea taajuusreservi. Nopeaa taajuusreserviä käytetään pienen inertian tilanteiden hallintaa varten. Inertialla tarkoitetaan pyöriviin massoihin varastoituneen energian kykyä vastustaa taajuudenmuutoksia. Nopean taajuusreservin tarve on riippuvainen inertiasta, joten sen hankintamäärä vaihtelee ja reserviä hankitaan vain osalle päivän tunneista. Reservin tarkoituksena on varmistaa, ettei sähköntuotantoyksikön tai tasasähkösiirtoyhteyden putoaminen verkosta aiheuta verkon taajuuden putoamista alle 49,0 Hz:n tason. (Fingrid, 2025c) Taulukossa 3. on esitetty Nopean taajuusreservin vaaditut aktivointiajat eri taajuusalueilla.

Taulukko 3. FFR:n aktivointiajat (Fingrid, 2025c)

Aktivointitaajuus (Hz)	Aktivointiaika (s)
49,7	1,3
49,6	1
49,5	0,7

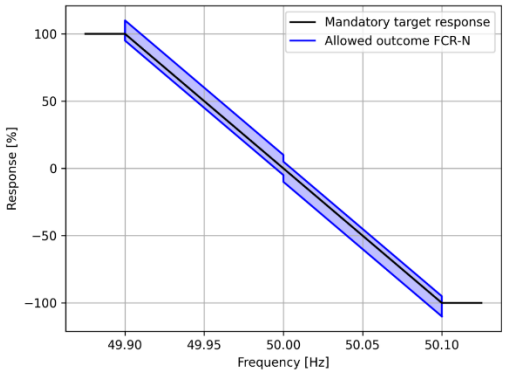
Suomen osuus Pohjoismaiden enintään n. 300 MW potista vaihtelee 0–60 MW:n välillä. Nopean taajuusreservin tarjouksen vähimmäiskapasiteetti on 1 MW ja enimmäiskapasiteetti 10 MW. Aktivointi perustuu reservin tarjoajan omiin taajuusmittauksiin, eikä Fingridiltä tule erillistä ohjaussignaalia (Fingrid, 2025c)

4.2.2 Taajuusohjattu käyttö- ja häiriöreservi

FCR-reservit aktivoituvat automaattisesti taajuuspoikkeamien mukaan. Kysyntäjousto voi toimia sekä ylös- että alassäätönä. Ylössäädöllä tarkoitetaan tuotannon lisäystä tai kulutuksen vähentämistä ja ylössäädön hinta määräytyy kalleimman hyväksytyn ylössäätötarjouksen mukaan. Alassäädöllä tarkoitetaan tuotannon vähennystä tai kulutuksen lisäystä ja alassäädön hinta kalleimman hyväksytyn alassäätötarjouksen mukaan. (Fingrid,

2024g). Fingrid ei lähetä ohjaussignaalia vaan joustokohteessa on oltava omat mittauslaitteet ja automaatio jouston toteutusta varten.

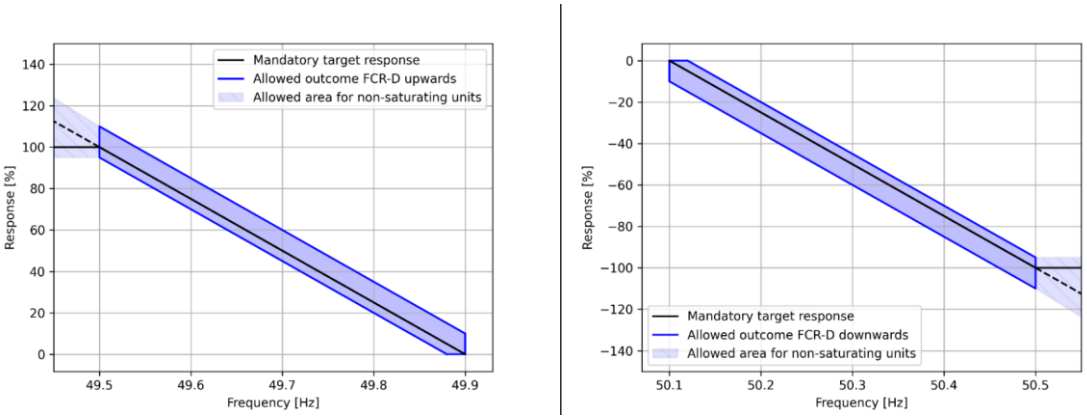
Taajuusohjattu käyttöreservi (FCR-N) ja taajuusohjattu häiriöreservi (FCR-D) ovat automaattisesti taajuusmuutoksiin reagoivia pätötehoreservejä. Ne kuuluvat taajuuden vakautusreserveihin (Frequency Containment Reserve, FCR) ja niitä käytetään taajuuden jatkuvaan hallintaan. Taajuusohjattu käyttöreservi pyrkii ylläpitämään taajuutta normaalilla taajuusalueella, joka on 49,9–50,1 Hz ja sen säätötarjouksen vähimmäiskoko on 0,1 MW. Taajuusohjatun käyttöreservin tulee toimia noin 63 % teholla 1 minuutin sisällä ja 95 % teholla 3 minuutin sisällä aktivointipyynnöstä. FCR-N on symmetrinen ja sen täytyy kyetä sekä ylös- että alassäätöön. (Fingrid, 2024g). Kuvassa 5. on esitetty taajuusohjatun käyttöreservin tavoitteellinen ja sallittu taajuusvaste, joka on todennettava mittauksin.



Kuva 5. FCR-N kohteen vaadittu taajuusvaste (Fingrid, 2024g)

Taajuusohjattu häiriöreservi puolestaan varmistaa, että taajuus pysyy vähintään 49,5 Hz tai enintään 50,5 Hz alueella. Taajuusohjatun häiriöreservin vähimmäistarjouskoko on 1 MW sekä ylös-, että alassäätötilanteessa ja säädön tulee toimia 86 % teholla 7.5 sekunnin sisällä aktivointipyynnöstä. (Fingrid, 2024g). Taajuusohjattu häiriöreservi on jaettu kahteen erilliseen tuotteeseen: FCR-D ylös ja FCR-D alas. Tämä on hyödyllistä kohteille,

jotka eivät esimerkiksi pysty lisäämään tuotantoa, mutta kykenevät pudottamaan sitä. Kuvassa 6. on esitetty taajuusvasteet FCR-D ylössäädölle ja FCR-D alassäädölle.



Kuva 6. Taajuusohjatun häiriöreservin taajuusvasteet (Fingrid, 2024g)

FCR-tuotteilla voidaan käydä kauppaa sekä vuosimarkkinoilla, että tuntimarkkinoilla. Vuosimarkkinoilla joustolle määräytyy kiinteä tuntihinta ja tuntimarkkinoilla kysynnän ja tarjonnan tasapaino muodostaa tuntikohtaisen hinnan. Tuntimarkkinoiden korvaus on yleensä korkeampi kuin vuosimarkkinoiden. Esimerkiksi vuonna FCR-D alassäädön 2024 tuntimarkkinoiden keskimääräinen korvaus oli 16.58 €/MW, kun taas vuosimarkkinoiden kiinteä hinta oli 9.5 €/MW. Vuosimarkkinoiden etuna on ennustettavuus ja se soveltuu kohteille, joiden on tärkeää tietää vakaa hinta joustolle.

4.2.3 Säätösähkö- ja kapasiteettimarkkinat (mFRR)

Kantaverkkoyhtiö Fingridin tehtävänä on muiden pohjoismaisten kantaverkkoyhtiöiden kanssa ylläpitää säätösähkömarkkinoita. Koska Fingridillä ei ole omaa säätökapasiteettia, on sen verkon tehotasapainon saavuttamiseksi ja käyttövarmuuden takaamiseksi ostettava säätösähköä näiltä säätösähkömarkkinoilta.

Säätösähkömarkkinoilla reservitoimittajat tekevät tarjouksen käytössään olevasta säästösähkökapasiteetistaan. Reservitoimittaja sitoutuu kapasiteettikorvausta vastaan jättämään tarjouskilpailussa hyväksyttyjä kapasiteettitarjouksia vastaavan määrän säätösähkömarkkinoille.

Säätösähkötarjouksen voi tehdä resurssista, joka kykenee toteuttamaan vähimmäiskapasiteetin mukaisen tehonmuutoksen 15 minuutissa. Säätösähkötarjouksen vähimmäiskapasiteetti on 5 MW. Elektronisesti aktivoitavalla resurssilla on 1 MW:n

vähimmäiskapasiteettivaatimus. Elektronisella aktivoinnilla tarkoitetaan sitä, että Fingrid lähettää sanoman reservikapasiteetin tarjoajalle tai tämän edustajalle. Tarjoukset annetaan 1 MW:n tarkkuudella ja reservikohtaisen tarjouksen maksimikapasiteetti on 200 MW. (Fingrid, 2025d)

19.11.2024 otettiin käyttöön pohjoismaiden yhteinen mFRR-kapasiteettimarkkina. Tämä mahdollistaa rajasiirtokapasiteetin varaamisen mFRR-tuotteelle. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että pohjoismaat pystyvät tarjoamaan ja ostamaan kapasiteettia maiden välillä ja tämä lisää reservimarkkinoiden joustavuutta. Markkinapaikkana toimii Fifty Nordic MMS, joka on jo tällä hetkellä käytössä aFRR-kapasiteettimarkkinan markkinapaikkana. mFFR:n rajasiirtokapasiteetti on jaettu aFRR-kapasiteetin kanssa ja se on maksimissaan 5 % tuonti- ja 10 % vientisuuntaan. Pohjoismaiden säätösähkömarkkinoilla siirrytään myös 15 minuutin tasejärjestelmään, joka mahdollistaa toimittajalle 15 minuutin säätötarjousten jättämisen. Säätötarjousten valinta ja aktivointi tapahtuu myös 15 minuutin jaksoissa. (Energiavirasto, 2024)

4.2.4 Automaattinen taajuuden palautusreservi (aFRR)

Automaattinen taajuuden palautusreservi (aFRR) on reservituote, joka aktivoituu automaattisesti kantaverkkoyhtiön tehonmuuntosignaalin mukaisesti. Tämän reservin tarkoituksena on palauttaa sähköjärjestelmän taajuus nimellisarvoonsa ja saattaa tehotasapaino takaisin taajuudensäätöalueelle suunniteltuun arvoon. Osallistuakseen säätöön toimittajan on pystyttävä tarjoamaan vähintään 1 MW säätöä, joka voidaan aktivoida viiden minuutin kuluessa. Säätö on aloitettava enintään 30 sekunnin sisällä aktivointisignaalista. Reservin tulee vastata tehon pyynnöstä 90–110 prosentin tarkkuudella. Pohjoismaiden synkronialueen kokonaissäätötarve on 200–400 megawattia, josta Suomen osuus on 30–60 MW. (Fingrid, 2025e)

Reservin toimittajan on suoritettava säätökoe Fingridin ohjeiden mukaisesti markkinakelpoisuuden varmistamiseksi. Fingrid voi halutessaan lähettää edustajan osallistumaan säätökokeeseen. aFRR:stä maksetaan korvausta sekä ylläpidetystä tuntikohtaisesta kapasiteetista että toteutuneen säädön määrästä. Fingrid ilmoittaa etukäteen ne tunnit, jolloin se hankkii aFRR:ää, keskittyen tunteihin, joina taajuus vaihtelee eniten. Tarjoukset ylös-

ja alassäädöstä tehdään erikseen, ja korvaus maksetaan sekä kapasiteetin ylläpidosta että toteutuneesta energiakorjauksesta. (Fingrid, 2025e)

4.2.5 Reservituotteiden kaupankäyntialustat

Reservituotteilla käydään Suomessa kauppaa kahdella kaupankäyntialustalla, Vaksissa ja Fifty NMSS:ssä. Taulukossa 4. on esitetty reservituotteiden kaupankäyntialustat

Taulukko 4. Reservituotteiden kauppa-alustat (Fingrid, 2025f)

		Reservituote						
		FFR	FCR-D	FCR-N	aFRR-kapasiteetti	aFRR-energia	mFRR-kapasiteetti	mFRR-energia
Alusta	Vaksi	x	x	x		x		x
	Fifty NMMS				x		x	

Vaksi on internet-pohjainen sovellus ja reservimarkkinoiden pääasiallinen kaupankäyntialusta. Siellä reservitoimittajat pystyvät jättämään ja hallinnoimaan tarjouksia, sekä näkemään hyväksytyt tarjoukset. Fifty NMMS on Fiftyn:n kehittämä pohjoismainen kaupankäyntialusta ja sitä käytetään aFRR ja mFRR kapasiteettimarkkinoilla.

4.2.6 Reservituotteiden tiedonvaihto ja reaaliaikaraportointi

Reservitoimittajalla on velvollisuus toimittaa reaaliaikaista tietoa Fingridille. Tiedonvaihdon on vastattava reservikohteen viimeisimpien säätökokeiden vaatimuksia. Reservikohteiden tilatietojen siirtoon käytettävät menetelmät ovat FEN- tai KoVa-FEN-verkko (ICCP- tai IEC 60870-5-104-protokolla) sekä web-tiedonsiirto. Reservitoimittajan on huomioitava, että aFRR:ssä käytettävänä toimitustapana on ICCP-protokolla.

FEN tulee sanoista Finnish Elcom Network ja FEN- sekä KoVa-FEN verkkojen palveluntarjoajina toimivat Suomessa Erillisverkot Oy ja Volue Oy. FEN-verkko on Fingridin ja energiayhtiöiden välistä tiedonsiirtoa varten rakennettu verkko ja sen avulla osapuolten välinen tiedonsiirto turvataan häiriötilanteissa. KoVa-FEN on FEN-verkon päivitetty versio, jossa puhe- ja tietoliikenneyhteydet taataan toimivaksi vähintään 24 tunnin ajaksi. (Fingrid, 2025g)

Reservitoimittajan on mahdollista luoda tiedonsiirtoyhteys itsenäisesti tai ostaa palvelu palveluntarjoajalta. Jos tiedonsiirtoyhteys ostetaan palveluntarjoajalta, on huomioitava, että reaaliaikatiedot jaetaan palveluntarjoajalle ja sen jälkeen kaikki reaaliaikakommunikaatiotestaaminen tapahtuu palveluntarjoajan ja Fingridin toimesta. (Fingrid, 2025f).

FCR-kohteesta on toimitettava ylläpidettävä reservin teho ja hetkellinen pätöteho. Reservimäärä on toimitettava erikseen FCR-N:stä ja FCR-D ylös-, sekä alassäädöstä. Jos kohde on sääriippuvainen, on lisäksi toimitettava saatavilla oleva pätöteho. FCR-kohteen tiedonvaihdon suurin sallittu päivitystiheys on 60 sekuntia ja sääriippuvaiselle kohteelle 10 sekuntia, ellei Fingridin kanssa ole asiasta toisin sovittu. (Fingrid, 2025f)

FFR-kohteesta on toimitettava ylläpidettävä reservin teho ja sekä hetkellinen pätöteho. Jos kohde on sääriippuvainen, on lisäksi toimitettava saatavilla oleva pätöteho. FFR-kohteen tiedonvaihdon suurin sallittu päivitystiheys on 60 sekuntia ja sääriippuvaiselle kohteelle 10 sekuntia, ellei Fingridin kanssa ole asiasta toisin sovittu. (Fingrid, 2025f)

aFRR-kohteesta on toimitettava ylläpidettävä reservikapasiteetti, hetkellinen pätöteho, aktivoituneen reservin määrä, Fingridin lähettämän aktivointisignaalin takaisinlähetys ja Fingridin lähettämän watchdog-signaalin takaisinlähetys. Watchdog signaalin tiedonvaihdon päivitysväli on 4 sekuntia, muuten tiedonvaihdon päivitysväli on 10 sekuntia. Ylös- ja alassäätökapasiteetti on toimitettava erikseen ja sääriippuvaisen kohteen on toimitettava saatavilla oleva pätöteho. (Fingrid, 2025f)

mFRR-kohteesta on toimitettava pätötehomittaus tai vaihtoehtoisesti jokin muu todennettava reaaliaikainen tieto, jotta aktivointi voidaan todentaa. Tiedonvaihdon suurin sallittu päivitysväli on 60 sekuntia, ellei Fingridin kanssa ole asiasta toisin sovittu. (Fingrid, 2025f)

4.2.7 Kysyntäjouston reservituotteen hyväksyttämisprosessi

Kysyntäjoustomarkkinoille osallistuminen vaatii hyväksynnän Fingridiltä. Hyväksymisprosessi alkaa esitietojen toimittamisella, jolloin Fingridin ja reservipalveluntarjoajan välillä käydään läpi reservikohteen soveltuvuutta ja tietoliikenneyhteyksien tarpeellisuutta esimerkiksi aFRR:n käyttöönotossa. Seuraavaksi suoritetaan säätökokeet, joissa selvitetään reservikohteen kelpoisuus toimittaa joustoa vaatimusten mukaisesti. Viimeisenä on

laitteiston kytkeminen ja sopimusten allekirjoitus, jonka jälkeen reservikohde voidaan ottaa markkinoille. Kuvassa 7. on listattu hyväksyttämisprosessin vaiheet tarkemmin.

Kuva 7. Kysyntäjouston reservituotteen hyväksyttämisprosessi (Fingrid, 2025h)

4.2.8 Säätökokeet ja sopimusvaatimukset

Omaan mittaukseen tai Fingridin automaattisen ohjauksen takana olevat reservit vaativat säätökokeen ennen käyttöönottoa. Kuvassa 8. on esitetty FFR- ja FCR-säätökoeprosessi ja kuvassa 9. aFRR-säätökoeprosessi yksinkertaistettuna.

Kuva 8. FFR- ja FCR-säätökoeprosessi (Fingrid, 2025h)

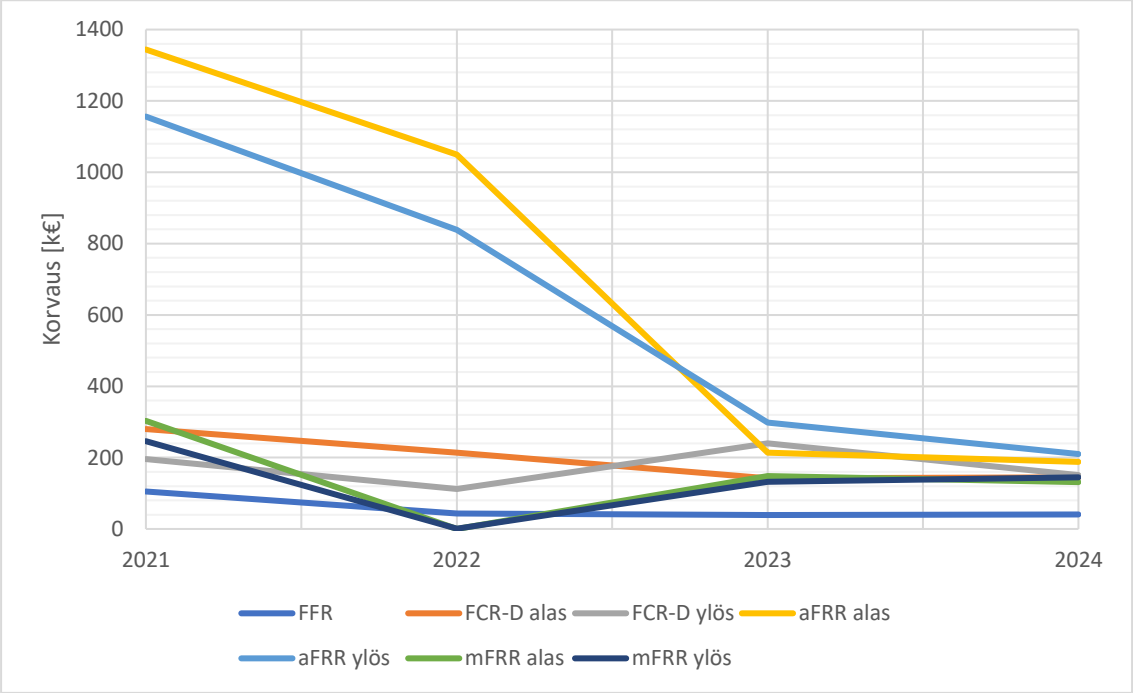
Kuva 9. aFRR säätökoeprosessi (Fingrid, 2025h)

Itse säätökokeet ovat erilaisia reservikohteesta riippuen, sillä niille on asetettu erilaiset tekniset vaatimukset. Fingridin sivuilta löytyy tarvittavat dokumentit vaatimuksista

säätökokeen suorittamista varten. mFRR markkinalle osallistuttaessa ei tarvita säätökoetta.

4.2.9 Reservimarkkinoiden kapasiteettikorvausten kehitys

Reservimarkkinoiden kapasiteettikorvaus vaikuttaa olennaisesti investointien kannattavuuteen. Viime vuosina kapasiteettikorvausten trendi on ollut selvästi alaspäin lisääntyneen tarjonnan vuoksi, mutta näyttää tasaantuneen. Kuvassa 10. on esitetty reservimarkkinoiden kapasiteettikorvauksista saatavat potentiaaliset tuotot vuosilta 2021–2024 1 MW:n reservikapasiteetilla ja 100 % käyttöasteella.



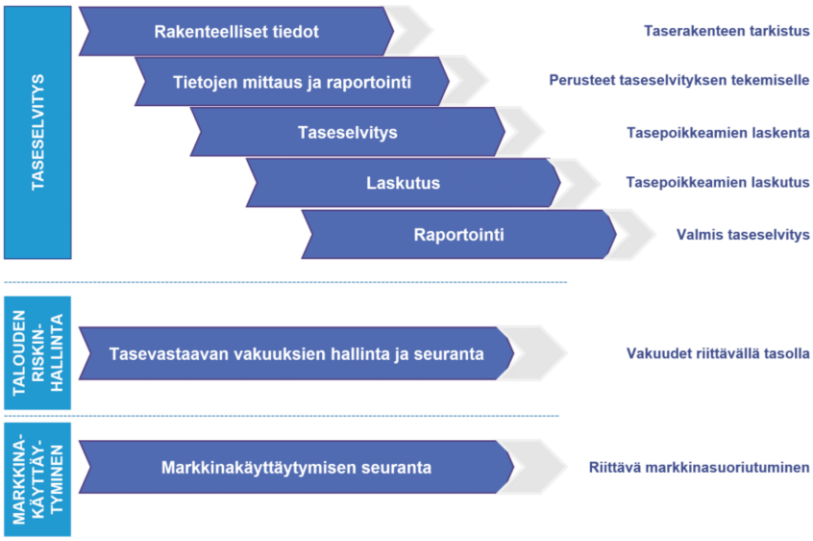
Kuva 10. Reservimarkkinoiden potentiaaliset tuotot (Fingrid, 2025i)

Santeri Tirrosen diplomityössä on käyty läpi sähkömarkkinoiden osa-alueiden kehitystä vuosina 2025–2030 ja työn lopputuloksissa on esitetty, että hintavolatiliteetti pysyy korkeana energiamurroksen takia, mutta markkinat ovat pitkällä aikavälillä vakaat. Energiakriisit ja erikoistilanteet voivat lyhyellä aikavälillä aiheuttaa muutoksia hinnoitteluun. Kapasiteettikorvausten vakiintuminen on myös seurasta lisääntyneestä kilpailusta, sillä perinteisten teollisuus ja voimalaitoskohteiden rinnalle on noussut energiavarastoja, sekä pienempiä joustokohteita kuten tässä työssä käsiteltyjä sähkökattiloita. (Tirronen, 2025)

5 Taseselvitys

Taseselvityksen avulla sähkömarkkinoille pyritään luomaan taloudellinen tasapaino käyttöjakson jälkeen. Taseet lasketaan tasevastaaville sähköpörssikauppojen, kahdenvälisten kauppojen sekä toteutuneen kulutuksen ja tuotannon suhteen mukaan. Tasevastaavat on taloudellisessa vastuussa tasepoikkeamista ja näitä poikkeamia tasataan tasesähkömarkkinoilta ostettavalla tasesähköllä. eSett vastaa pohjoismaisen tasemallin ylläpitämisestä, joka perustuu harmonisoituun yhden taseen malliin. eSett on tuottaa palveluita pohjoismaiden neljälle kantaverkkoyhtiölle: Fingridille, Energinetille, Stattnetille ja Svenska Kraftnätille.

Pohjoismainen taseselvitysmalli jaetaan seuraaviin pääryhmiin: rakenteellisten tietojen hallintaan, tietojen mittaukseen ja raportointiin, taseselvitykseen sekä laskutukseen ja raportointiin. Malliin kuuluu lisäksi taloudellisten riskien hallinta ja markkinakäyttäytymisen analysointi. Taseselvitysmallin toiminnot on avattu tarkemmin kuvassa 10.



Kuva 11. Taseselvitysmallin toiminnot (eSett, 2023)

Pohjoismaisen taseselvitysmallin mukaan tasepoikkeama on mitatun tuotannon, kulutuksen, kauppojen, mittausalueen tasepoikkeaman ja tasepoikkeamakorjauksien välinen poikkeamana. Tasepoikkeaman laskenta tehdään markkina-aluekohtaisesti ja määrä lasketaan saaduilla taseselvitystiedoilla. Tasepoikkeaman laskennassa huomioidaan myyjäkohtaiset mitatut ja profiloidut kulutukset mittausalueittain, mitatut tuotannot tuotantoyksiköittäin, rajapistemittaussummat viereisiä mittausalueita kohden, päivittäisen ja jatkuvan kaupankäynnin kauppatapahtumat markkinatasealueittain, kahdenväliset kaupat markkinatasealueittain, sekä

tasepoikkeamakorjaukset, jotka muodostuvat FCR, FFR ja FRR summasta. (eSett, 2023) taulukossa 5. on esitetty tasepalvelumaksut Suomessa vuonna 2025. On huomioitava, että tasevirheestä seuraa tasesähkökauppaa, jossa tasesähköstä maksetaan suuntaan tai toiseen tasesähkön hinta, ja tästä voi seurata merkittäviä lisäkustannuksia. Taulukon volyymimaksut ovat pieniä verrattuna tasesähkön hintaan.

Taulukko 5. Tasepalvelun maksut (Fingrid, 2025j)

Tasepalvelun maksut 1.1.2025 alkaen	
Kiinteä viikkomaksu	30 €/vko
Tuotannon ja kulutuksen volyymimaksu	1,73 €/MWh
Tasepoikkeaman volyymimaksu	1,15 €/MWh

6 Kysyntäjouston tekninen toteutus ja kehitystrendit

Tässä luvussa tarkastellaan kysyntäjouston teknistä toteutusta, vaatimuksia, sekä tulevaisuuden kehitysnäkymiä. Teknisiä ratkaisuja ovat esimerkiksi älymittaroinnin hyödyntäminen ja älykkäiden sähköjärjestelmien kuten KNX:n hyödyntäminen. Ohjattavat resurssit, kuten sähkölämmitys, ilmanvaihto, kylmäkoneet ja sähköautojen lataus, tarjoavat vaihtelevia kysyntäjoustomahdollisuuksia.

6.1 Älymittarit ja dynaaminen kuormanhallinta

Kun Suomessa ja muualla Euroopassa siirrytään varttitaseeseen, täytyy myös sähkömittareiden pystyä lähettämään tietoa 15-minuutin välein. Varttimittausvelvoite onkin pakottanut Suomen sähköyhtiöt päivittämään mittarit vastaamaan vaatimuksia, jotka energiavirasto on määrittänyt. Laitteiston päivittäminen on porrastettu ja se aloitettiin päivittämällä kaikki ohjelmointiin kykenevät tuntimittauslaitteistot 22.5.2023. Jos kiinteistön sähkömittaria ei ole ollut mahdollista päivittää varttimittaukseen, tulee se uusia vuoden 2028 loppuun mennessä ja mittarinvaihtoon asti tunnin mitattu kulutustieto jaetaan vartin jaksoihin. Myös 2023 päivitetyt mittarit on uusittava uudempiin etäluettaviin malleihin viimeistään 4.7.2031. (Energiavirasto, 2025)

Sähkömarkkinalain mukaisesti uusissa etämittareista täytyy olla kuormanohjauskomentoja varten erillinen kuormanohjausrele. Kuormanohjausrelettä pitää pystyä ohjamaan viestintäverkon kautta ja verkonhaltijan täytyy varmistaa, että kuormanohjauspyyntö toteutuu kuuden tunnin sisällä ohjauskäskystä. (Finlex, 2021) Kuormanohjaustoiminnallisuus otetaan käyttöön siihen kykenevillä etämittauslaitteilla vuoden 2026 alussa. Kuormanohjaustoiminnallisuutta ei kuitenkaan vaadita käyttöpaikoilla, joissa on yli 3*63 ampeerin pääsulakkeet, yli kahden asunnon asuinrakennuksissa tai toimisto-, liike, teollisuus ja varastorakennuksissa. (Finlex, 2021)

Uudet etäluettavat älymittarit ovat myös liitettävissä asiakasrajapintaan HAN-väylän kautta, mikä mahdollistaa mittarin liittämisen osaksi kotiautomaatiojärjestelmää. Kuvassa 11. on esitetty Suomessa sähköverkkoyhtiöiden tarjoaminen älymittareiden toiminnallisuuksia. Mittarit noudattavat SESKO:n SK 13-1:2021 suositusta sähköenergiamittareiden paikallista asiakasrajapintaan varten.

Ohjaustapa	Aidon Oy	Kamstrup A/S	Landis+Gyr Oy
Kalenteriohjaus, esim. aikajaotuksen mukaiset ohjaukset	X, mittauslaitteelle konfiguroitavissa oleva kiinteä kalenteri.	X, mittauslaitteelle konfiguroitavissa oleva kuorman-ohjaustaulukko.	X, toistaiseksi voimassa oleva pohjakalenteri.
Ajastettu ohjaus kalenteriohjauksina, esim. spot-hintaohjaukset	X, dynaaminen kalenteriohjaus mahdollistaa päiväkohtaisen ohjauskalenterin asettamisen.	X, kuormanohjaus-taulukon päiväkohtainen päivittäminen.	X, kalenteriohjaus seuraavalle vuorokaudelle erikoispäiväkäsittelyllä.
Välittömät yksittäisohjaukset, esim. tasehallinnan tarpeeseen	X, heti tai ajastettuna yhdelle ohjausjaksolle.	O, tuki puuttuu luentajärjestelmästä. Erilliset päälle-pois-ohjaukset.	X, välitön ohjaus. Erilliset päälle-pois-ohjaukset.
Ohjaustapojen priorisointi	1. Välitön ohjaus 2. Dynaaminen kalenteriohjaus 3. Kalenteriohjaus	Uusi ohjauskomento korvaa aiemman tietyin rajoittein. Ohjaukset palautuvat lopulta kalenterin mukaisiin ohjauksiin.	Viimeinen komento pätee -periaate. Ohjaukset palautuvat lopulta kalenterin mukaisiin ohjauksiin, mikäli kalenteri pohjalla.

Kuva 12. Älymittareiden toimintoja (Afry, 2024)

HAN-portin kautta voidaan lähettää mittarin tietoja paikallisverkon kautta siihen liitetyille laitteille. HAN-portin kautta ei voi syöttää tietoja mittarille, jotta käyttäjä ja siihen liitettävät laitteet eivät pysty vaikuttamaan mittausyksikön toimintaan. (SESKO, 2022) SESKO:n suosituksen mukaiset perusperiaatteet ovat:

- Järjestelmään on helppo liittää asiakkaan laitteita
- Järjestelmän on oltava yksinkertainen toteuttaa ja käyttää
- Järjestelmän kustannukset käytön ja ylläpidon osalta sekä kuluttajalle, että sähköverkkoyritykselle
- Järjestelmän on täytettävä sähköturvallisuusvaatimukset
- Järjestelmä ei saa vaarantaa asiakkaan tai verkonhaltijan tietoja

Tällä hetkellä HAN-väylän käyttöönoton suurin haaste on siihen liittyvien väyläintegraatioiden puute. Tommi Sunin tekemässä opinnäytetyössä tehdyn tilaajan haastattelun mukaan väyläintegraatioiden puutteen takia soveltuvia ohjelmia eikä osaamista ole vielä toistaiseksi paljon. (Suni, 2024). Tällä hetkellä dynaamista kuormanhallintaa hyödynnetään erityisesti sähköautojen latauksessa, johon markkinoilta löytyy useita toimivia ratkaisuja. Esimerkiksi Enegic valmistaa dynaamista kuormanhallintaa varten HAN-porttiin kytkeytyvää kuormanhallintalaitetta, joka on yhteensopiva useimpien sähköauton latauslaitteiden kanssa. Järjestelmä rajoittaa

sähköauton latauslaitteen tehoa, kun kiinteistön muu kuorma kasvaa. HAN-portin etuna on sen käyttöönoton helppous. Myös suomalainen älykotiratkaisujen tarjoaja Cozify tarjoaa HAN-väylään kytkettävää laitetta, jonka avulla kiinteistön älymittari saadaan liitettyä osaksi Cozify-älykotijärjestelmää. Tällöin on mahdollista valvoa ja ohjata kiinteistön kuorman jakautumista vaiheiden välillä ja liittää laitteita kuten lämmitystä ja ilmastointia osaksi kuormanhallintaa.

6.2 Ohjattavat resurssit

Tässä luvussa selvitetään kysyntäjoustoon osallistuvien resurssien joustopotentiaalit ja tunnistetaan olennaisimmat joustoresurssit kysyntäjouston kannalta. Ramboll Finland Oy:n pääasialliset suunnittelukohteet ovat isoja julkisrakennuksia, kauppakeskuksia ja asuinrakennuksia, joten ohjattavat resurssit tunnistetaan näiden kohteiden vaatimusten mukaisesti.

6.2.1 Ilmanvaihto

Ilmanvaihto muodostaa nykyisin merkittävän osan rakennusten sähkönkulutuksesta ja se soveltuu hyvin kysyntäjoustoon. Esimerkiksi kauppakeskus Sellossa ilmanvaihto voi viedä kesäpäivänä 700 kW (Manninen, 2017) jolloin sillä voitaisiin osallistua esimerkiksi taajuusohjattuun käyttöreserviin. Ilmanvaihdolla pystytään tekemään ylös- sekä alassäätöä. Lappeenrannan kaupunki on toteuttanut kysyntäjoustohankkeen Siemensin kanssa, jossa 17 kiinteistön ilmanvaihtokoneet on liitetty yhdeksi n. 100 kW:n kokonaisuudeksi. Kauppaa käydään FCR-N markkinapaikalla, sillä ilmanvaihtojärjestelmät kykenevät hyvin sekä ylös-, että alassäätöön ilman merkittävää vaikutusta huoneen ilmanlaatuun. Järjestelmä maksoi itsensä takaisin kahdessa vuodessa. (Yle, 2023)

Ilmanvaihdon kysyntäjouston toteutuksessa on otettava huomioon ilmanlaatuvaatimukset ja toteutus onkin hyvin tapauskohtainen. RT-kortistossa on määritelty ilmanlaadun raja-arvot ja ne on jaettu kolmen luokkaan: S1, S2 ja S3. S1 on korkein ilmanlaatuluokka tarkoitten erittäin hyvää ilmanlaatua, S2 hyvää ilmanlaatua ja S3 tyydyttävää ilmanlaatua. Kiinteistöjen suunnittelussa pyritään ainakin S2-ilmanlaatuluokkaan (Manninen, 2017). Suurempi ilmamassa reagoi muutoksiin hitaammin ja jokaisessa kohteessa on

tärkeää suorittaa ilmanlaatumittaukset pudotetulla teholla, jotta joustomahdollisuutta pystytään arvioimaan.

6.2.2 Kylmäkoneet

Kiinteistöjen jäähdytys muodostaa usein merkittävän osan niiden sähkönkulutuksesta ja suurissa kiinteistöissä niiden vaatima sähköteho voi nousta satoihin kilowatteihin. Kylmäkoneet toimivat jäähdytyskompressoreilla ja niiden ottamaa tehoa voidaan rajoittaa säädettävällä taajuusmuuttajakäytöllä tai esimerkiksi kontaktoriohjauksen avulla pudottamalla kuorma kokonaan verkosta. Rajoitteena on ilmanvaihdon tapaan sisäilmaluokituksessa asetetut vaatimukset, joissa hyvän luokituksen saaminen vaatii hyvät lämpöolot. (Järventausta et al., 2015)

Elintarvikkeiden jäähdytykseen käytettävien kylmälaitteiden säätömahdollisuudet ovat rajallisemmat, sillä niiden pääasiallisena tavoitteena on estää elintarvikkeiden pilaantuminen. Jäähdytyksen ohjauksessa olisi varmistuttava, että se ei vaikuta elintarvikkeiden kuntoon ja tämä olisi todennettava mittauksin. Tämän takia elintarvikkeiden kylmälaitteiden ohjaus ei ole ensimmäinen vaihtoehto kysyntäjouston toteutukseen. (Järventausta et al., 2015)

6.2.3 UPS- ja varavoimajärjestelmät

Isojen kiinteistöjen UPS- ja varavoimajärjestelmät pystyvät tehonsa puolesta osallistumaan kysyntäjoustomarkkinoille. Dieselgeneraattoreiden osalta haasteita on useita. Reservimarkkinoilla toimiva joustokohde voi reservituotteen mukaan aktivoitua useita kertoja päivässä. Varavoimageneraattoreita ei ole suunniteltu jatkuvaan käyttöön ja kysyntäjousto voisi vaikuttaa niiden käyttövarmuuteen, sekä lisätä huoltojen tarvetta ja kustannuksia. Lisäksi generaattorit eivät pysty vastaamaan nopeisiin aktivointipyyntöihin, joten esimerkiksi taajuusohjattuun häiriöreserviin osallistuminen voi olla haasteellista. Fingridin pilotoimassa hankkeessa todettiin, että generaattorit käynnistyvät 15–30 sekunnissa (Fingrid, 2015). Useimmat generaattorit eivät siis pysty osallistumaan FCR-D markkinoille ainakaan ilman UPS-järjestelmän apua. FCR-N ja säätökapasiteettimarkkinoille olisi generaattoreilla mahdollista osallistua.

UPS-järjestelmät perustuvat akkuihin, joten niillä pystytään tarjoamaan joustoa välittömästi. Niillä on teoreettisesti mahdollisuus osallistua kaikille kysyntäjouston markkinapaikoille, kunhan järjestelmän teho ja kapasiteetti ovat riittäviä. UPS-järjestelmien osalta suurin haaste on, jos jouston takia järjestelmän kapasiteetti ei riitä kattamaan kiinteistön varavoimatarvetta häiriötilanteen sattuessa. UPS-järjestelmän osalta on siis varmistettava, että kysyntäjousto ei haittaa sen pääasiallista käyttötarkoitusta missään tilanteessa.

6.2.4 Sähköautojen lataus

Sähköautojen latausta on mahdollista hyödyntää kysyntäjoustossa lataustehoa rajoittamalla tai vehicle to grid (lyh. V2G) avulla. Lataustehon rajoittaminen eli dynaaminen kuormanhallinta perustuu tällä hetkellä laitetoimittajien omiin ratkaisuihin, eikä yksittäistä standardoitua ratkaisua ole vielä markkinoilla. Esimerkiksi HAN-portin kautta älymittariin yhdistetty sähköauton latauslaite kykenee teoriassa reagoimaan Fingridin ohjauspyyntöihin, mutta tätä varten pitää olla toimiva asiakasrajapinta.

VTT:n tekemän tutkimuksen mukaan sähköauton latauksella olisi mahdollistua osallistua sekä FCR-N, että FCR-D markkinoille. Tutkimuksen lopputuloksena oli, että voiton tavoittelun kannalta paras ratkaisu olisi käyttää FCR-N ja FCR-D tuotteiden yhdistelmää, mutta vaikutukset asiakkaiden latauskäyttäytymiseen olisivat rajallisemmat pelkällä FCR-D markkinalle osallistumisella. (Astero ja Evens, 2021)

SFS 6000 -pienjänniteasennusstandardin vuoden 2022 version vaatimusten mukaisesti ajoneuvon sähkönsyöttö kiinteistöön on sallittua vain SFS-EN 62126 -standardin mukaisella pistokytkimellä. Tämä tarkoittaa, että suko- tai voimavirtapistorasioista ei voida käyttää V2G-järjestelmän toteutukseen. V2G-järjestelmän standardointi on tällä hetkellä vaiheessa, mutta kehittyy jatkuvasti. (Sesko, 2023)

6.2.5 Akkuvarastot

Akkuvarastot toimivat hyvin reservimarkkinoilla ja niistä löytyy jo käytännön esimerkkejä. Lappeenrannassa sijaitsee Neoen:in akkuvarasto Yllikkälä Power Reserve, jonka kapasiteetti on 30 MW / 30 MWh. Laitoksen viereen on rakentumassa Yllikkälä Power Reserve Two, joka on valmistuessaan pohjoismaiden suurin akkuvarasto 56,4 MW /

112,9 MWh kapasiteetillaan. Molemmat akkuvarastot on suunniteltu tukemaan Suomen sähköverkkoa ja ne toimivat reservimarkkinoilla. (Neoen, 2023)

Akkuvarastoja hyödynnetään myös liiketiloissa ja tästä hyvä esimerkki on kauppakeskus selloon toteutettu kiinteistöön sulautettu akkujärjestelmä. Sellon akkujärjestelmän kapasiteetti on 2,1 MWh ja se kykenee osallistumaan joustoon 2 MW:n teholla. (Sello, 2019) Akkuvarastojen potentiaali kysyntäjouston osalta riippuu niiden kapasiteetista. Isommat akkuvarastot pystyvät osallistumaan sekä reservi-, että säätökapasiteettimarkkinoille. Pienet akkujärjestelmät eivät ole kannattavia sähkön hintaan perustuvassa kysyntäjoustossa pitkän takaisinmaksuajan takia (Tenhunen, 2022), eikä niillä ole mahdollista liittyä suoraan reservimarkkinoille.

6.2.6 Valaistus

Valaistuksen joustopotentiaali on hyvin riippuvainen käytössä olevan valaistuksen kokonaistehosta, sekä valaisimien tekniikasta. Pienissä ja keskisuurissa kiinteistöissä, valaistuksen kokonaisteho ei riitä muuhun kuin taajuusohjattuun käyttöreserviin osallistumiseen. Valaistuksen kysyntäjoustolla voidaan myös osallistua sähköpörssin kauppapaikoille, jos kiinteistöllä on käytössä spot-hintaan perustuva sähkösopimus. (Pyykkö, 2020) Valaistuksen säädön osalta on tärkeää, että standardeissa asetetut valaistusvoimakkuuden raja-arvot eivät alitu. Valaistusvoimakkuuden raja-arvot voivat aiheuttaa osiltaan haasteita esimerkiksi toimistotiloissa, joissa valaistusteho on mitoitettu käyttötarpeen mukaan eikä valaistustehoa ole mahdollista pudottaa.

Suurin potentiaali valaistuksen kysyntäjoustolle on taajuusohjatussa käyttöreservissä, jonka pienin säädön tarjouskoko on 0,1 MW. Säätö on aktivoitava 3 minuutin kuluessa pyynnöstä, joka sopii valaistuksen säädölle hyvin. 3 minuutin aikarampilla säätö ei aiheuta merkittävää häiriötä käyttäjille (Pyykkö, 2020). Suurilla teollisuus- ja liikekiinteistöillä on suurempi potentiaali osallistua myös taajuusohjattuun häiriöreserviin, jonka pienin säädön tarjouskoko on 1 MW, mutta haasteen aiheuttaa säädön 7,5 sekunnin aktivointivaatimus, joka ei välttämättä ole mahdollista näissä kohteissa.

Teollisuusalueilla ja esimerkiksi kauppakeskusten pihalla on usein pihavalaisimia, joiden teho voi valaistustarpeen mukaan olla jopa yli 300 W. Isoilla kiinteistöillä näitä

valaisimia on usein monta kappaletta, ja sisävalaistuksesta poiketen niiden säätäminen ei välttämättä häiritse käyttäjiä yhtä paljon.

Valaistusteholtaan pieniä kiinteistöjä olisi mahdollista liittää kysyntäjoustoon aggregoinnin kautta. Tatu Pyykön diplomityössä selvitettiin valaistuksen potentiaalia kysyntäjoustossa ja työssä tehdyn case-tutkimuksen mukaisen liiketilan kokoisia pieniä myymälöitä olisi aggregoitava vähintään 575 kappaletta, jotta niillä pystyttäisiin toteuttamaan 1 MW tarjouskoko (Pyykkö, 2020). Juuso Jokiniemen diplomityössä taas tarkasteltiin kurkkujen kasvatukseen käytettävän kasvihuoneen valaistuksen kysyntäjoustopotentiaalia ja työssä havaittiin, että kasvihuoneella on mahdollista osallistua sekä taajuusohjattuun käyttöreserviin, että taajuusohjattuun häiriöreserviin (Jokiniemi, 2014).

6.2.7 Lämpöpumput

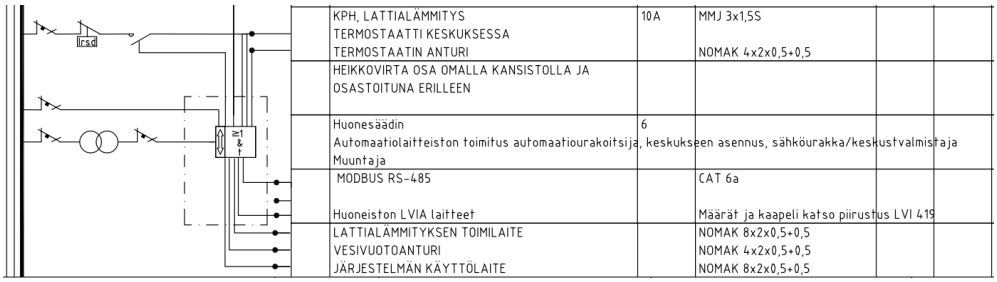
Lämpöpumput ovat isossa roolissa kiinteistöjen lämmitysjärjestelmissä. Lämpöpumppujärjestelmiä on useita erilaisia, esimerkiksi ja näitä ovat esimerkiksi maalämpöpumput ja vesi-ilmalämpöpumput. Lämpöpumput toimivat pääasiallisesti kiinteistöjen primäärisenä lämmitysmuotona ja niillä on usein tukilämmitysmuoto paikkaamassa lämmitystarvetta huipputehon aikaan. Lämpöpumpuilla on myös teoriassa mahdollistua osallistua sähkön reservimarkkinoille riippuen niiden kompressorien sähköteknisistä ominaisuuksista. Ilmastoinnin tapaan on kuitenkin varmistuttava, että sisäilman laatuun ei tule haitallisia vaikutuksia.

6.2.8 Sähkölämmitys

Ramboll Finland Oy:n viime vuosina suunnitelluissa liike- ja asuinkiinteistöissä suoraa sähkölämmitystä on käytetty lähinnä märkätiloissa. Lattialämmityksen yleinen mitoitusteho on 100 W/m^2, joten 4 m^2 WC-tilan lämmitystehoksi tulisi 400 W. Isoissa asuinkiinteistöissä lämmitettävästä pinta-alasta voisi kertyä merkittävä joustokohde.

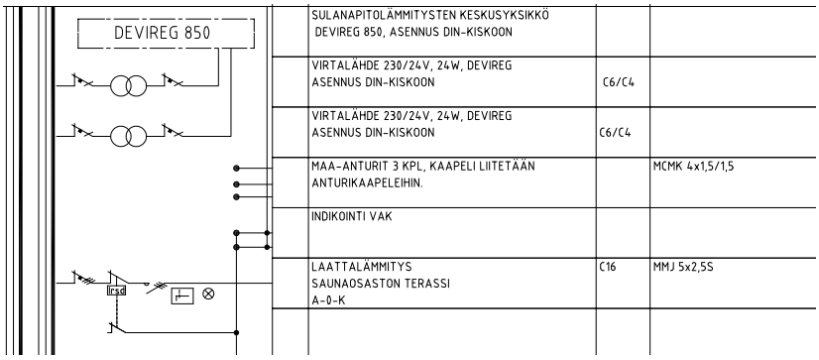
Vanhemmissa kiinteistöissä lämmitystä ohjaa termostaatti ja kytkentä on toteutettu kontaktorien avulla. Kontaktorikytkennät olisi helppo liittää osaksi automaatiojärjestelmää myös jälkikäteen. Uudemmissa kohteissa on myös huonesäätimiä, joiden avulla

lämmitys otetaan osaksi automaatiojärjestelmää heti alusta asti. Kuvassa 12. on esimerkki uuden kerrostalon lattialämmityksen toteutuksesta.



Kuva 13. Uuden kerrostalon lattialämmitys (Ramboll, 2025)

Kuvan kytkennässä termostaatti on yhdistetty huonesäätimeen ja Modbus-väylän kautta se on mahdollista liittää rakennuksen automaatiojärjestelmään. Saman rakennuksen sulanapitolämmitykset on taas toteutettu yksinkertaisella kontaktorikytkennällä, jossa ohjaus jätetään termostaatille tai voidaan kytkeä päälle ja pois käsikäyttöisesti. Kytkentä on esitetty kuvassa 13.



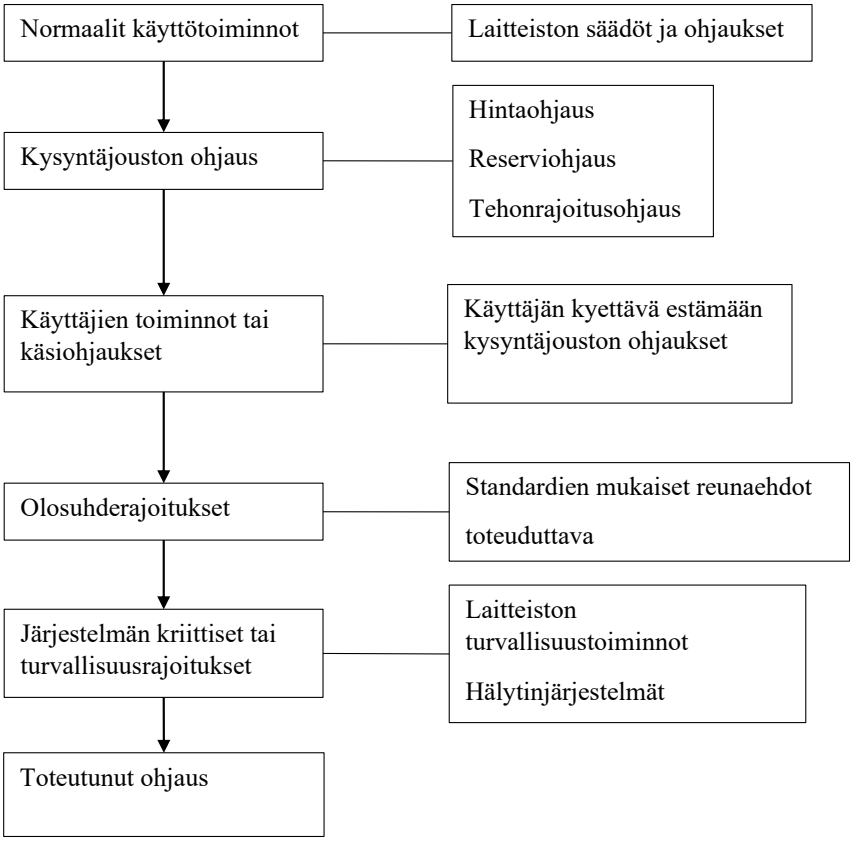
Kuva 14. Uuden kerrostalon sulanapitolämmitys (Ramboll, 2025)

Lämmityksen tilatieto välitetään valvonta-alakeskuksen, VAK:in, kautta rakennuksen automaatiojärjestelmään, mutta suora ohjaus ei ole mahdollista. Kontaktorikytkentä olisi kuitenkin helppo liittää osaksi automaatiojärjestelmää tulevaisuudessa. Liikekiinteistöissä lattialämmitys ei muodosta merkittävää osaa kokonaislämmityskuormasta, koska sitä käytetään yleensä vain märkätiloissa, mutta sulanapitolämmitystä voi kiinteistön pinta-alasta riippuen olla huomattavasti enemmän kuin asuinkiinteistöissä.

Sähkökattilat muodostavat mielenkiintoisen joustokohteen. Sähkökattiloita käytetään usein primääristä lämmitystä tukevana lämmitysmuotona ja näin ollen niille kertyy vuodessa vain rajallisesti käyttötunteja. Sähkökattilan hyödyntämiseen kysyntäjoustossa palataan työn loppuosassa tehtävässä case-tutkimuksessa.

6.3 Kysyntäjouston toimintojen priorisointi

Kysyntäjoustojärjestelmän suunnittelussa on huomioitava järjestelmän ohjaustoimintojen priorisointi. Kuvassa 14. on esitetty ohjaustoimintojen priorisointi, jotta ohjaus toimii halutulla tavalla ja turvallisuus edellä.



Kuva 15. Kysyntäjousto rakennusautomaation hierarkiassa. (Järventausta et al., 2015)

Kuvan mukaisesti laitteiston säädöt ja ohjaukset ovat hierarkiassa pohjalla, sillä niiden päällä on useita rajoittavia tekijöitä. Seuraavana on ohjaustoiminnot, joiden pohjalta järjestelmä toimii. Käyttäjän on kyettävä keskeyttämään laitteen tekemät ohjaustoiminnot ja se onkin seuraava priorisoinnin taso. Viimeiset rajoittavat tekijät liittyvät laitteen turvalliseen operointiin ja siihen, että se noudattaa standardeja ja turvallisuustekijät ovat hierarkiassa tärkeimmässä asemassa.

7 Kyselytutkimus kiinteistöjen kysyntäjoustosuunnuttelun nykytilasta

Tässä luvussa käydään läpi Rambollin kysyntäjouston suunnittelun nykytila. Tämä tehtiin kyselytutkimuksen muodossa, johon osallistettiin suunnittelijoita ja projektipäälliköitä. Tarkoituksena oli muodostaa käsitys työntekijöiden osaamisen tasosta koskien kysyntäjoustoa osana suunnitteluprosessia.

7.1 Kyselytutkimus

Kysyntäjouston suunnittelun nykytilan selvittämiseksi suoritettiin kyselytutkimus, jonka avulla määritettiin henkilöstön tietämystä aiheesta, sekä kysyttiin konkreettisia esimerkkejä kysyntäjouston suunnittelusta. Kyselyyn osallistuneet henkilöt valikoituivat teollisuus- ja suurten rakennusten puolelta. Kyselyyn vastasi suunnittelijoita ja projektipäälliköitä.

Laadullisessa tutkimuksessa (tai kvalitatiivisessa tutkimuksessa) keskitytään ilmiöiden syvälliseen ymmärtämiseen ja niiden merkityksen kartoittamiseen yksilöiden, ryhmien tai yhteisöjen näkökulmasta. Se eroaa määrällisestä tutkimuksesta (kvantitatiivisesta tutkimuksesta), jossa tilastoitua tietoa käsitellään numeerisesti. (Puusa, Juuti ja Aaltio, 2020)

Laadullisen tutkimuksen avulla pyritään ymmärtämään miten ihmiset kokevat ja tulkitsevat aihetta kokemuksien, ajatusten ja tunteiden avulla. Tämäntyyppinen tutkimus on erityisen hyödyllistä, kun halutaan tutkia ilmiöitä, joita ei voida mitata helposti määrällisesti. (Puusa, Juuti ja Aaltio, 2020). Koska rakennusten suunnitteluprosessi on moniulotteinen ja jokaisella on aiheesta oma subjektiivinen käsitys, sopii kvalitatiivinen kyselytutkimus hyvin kysyntäjouston suunnittelun yleisen tilanteen kartoittamiseen.

7.2 Tutkimusprosessi

Tutkimus suoritettiin kvalitatiivisena kyselytutkimuksena. Kyselyyn osallistuville esitettiin kysymykset ja heidän oli mahdollista osallistua suulliseen haastatteluun tai vastata kysymyksiin Microsoft Team:sin tai sähköpostin välityksellä. Kysymykset keskittyivät mittaamaan

henkilöstön yleistä ymmärrystä kysyntäjoustosta, sekä Rambollin osuutta sen toteutuksesta projekteissa. Tutkimuksessa esitettiin seuraavat kysymykset:

- Onko kysyntäjousto käsitteenä tuttu?
- Onko projekteissasi otettu kysyntäjousto huomioon tai oletko itse ollut suunnittelemassa kysyntäjoustoratkaisuja?
- Kenellä ollut vastuu kysyntäjouston toteutuksesta?
- Onko Ramboll aktiivisesti tarjonnut kysyntäjoustoratkaisuja vai onko tilaaja itse pyytänyt näihin liittyvää suunnittelua?
- Millaisia kysyntäjoustoon liittyviä tuotteita hyödynnetty suunnittelussa ja miltä valmistajilta? (esim. KNX-laitteet ja asiakasrajapinta)
- Millaisia kysyntäjoustoon liittyviä palveluita hyödynnetty ja miltä palveluntarjoajilta?

Kysely lähetettiin seitsemälle henkilölle, joista kaksi henkilöä ei osallistunut. Taulukossa 6. on esitetty kyselyyn vastanneiden tehtävät ja vastaajien toimiala.

Taulukko 6. Kyselytutkimukseen vastanneet henkilöt

Vastaaja	Tehtävä	Toimiala
1	Suunnittelija	Electrical Engineering Industry and Large Projects
2	Projektipäällikkö	Electrical Engineering Industry and Large Projects
3	Suunnittelija	Electrical Engineering Industry and Large Projects
4	Tiimipäällikkö	Electrical Engineering Industry and Large Projects
5	Suunnittelija	Electrical Engineering Industry and Large Projects

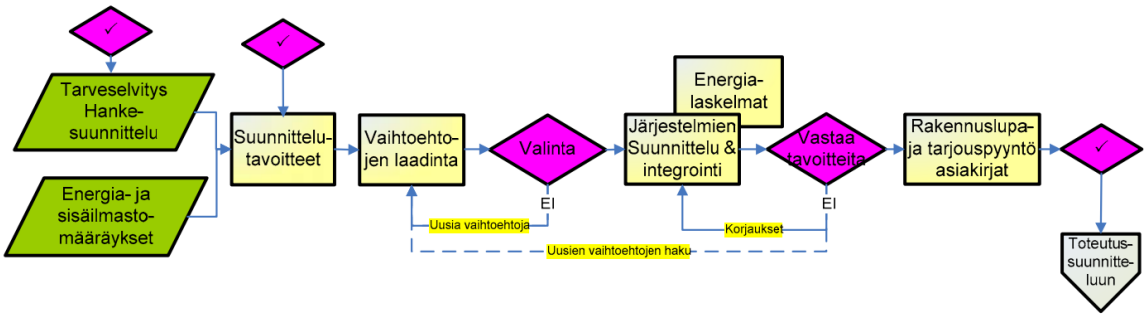
Kyselytutkimuksen tuloksena selvisi, että kysyntäjousto on käsitteenä tuttu (80 % tiesi mitä kysyntäjousto tarkoittaa vähintään yleisellä tasolla) ja kysyntäjousto otetaan huomioon useissa suunnitteluprojekteissa. Kysyntäjouston suunnittelu tulee vastaan useammin uudisrakennushankkeissa, joissa lähdetään suunnittelemaan älykästä rakennusta alusta lähtien. Saneerauskohteissa voidaan tehdä myös kysyntäjoustoratkaisuja, riippuen saneerauksen laajuudesta.

Vastuu kysyntäjouston toteutuksesta on kyselytutkimuksen perusteella ollut tyypillisesti tilaajalla. Tilaajan pyynnöstä on tehty elinkaarikustannuslaskelmia, kysyntäjoustoprofiilien vertailuja ja muuta kysyntäjouston toteutukseen liittyvää selvitystyötä. Rambollin puolelta näitä asioita on hoitanut siihen erikoistunut tiimi. Suunnittelijat voivat itse ehdottaa ratkaisuja tilaajalle, mutta päätös on lopussa tilaajan vastuulla. Tilaajalla voi myös usein olla ulkopuolisia neuvojia ja konsultteja, jotka toteuttavat kysyntäjoustoratkaisuja ja Ramboll osallistuu näiden tekniseen suunnitteluun varaamalla tarvittavat sähköpisteet ja mitoittamalla järjestelmän kysyntäjoustolaitteiston asettamien vaatimusten mukaan.

Haastateltavana oli työntekijöitä sähköosastolta, joten kyselyssä selvitettiin millaisia teknisiä ratkaisuja suunnittelussa, on hyödynnetty. Hankkeissa on hyödynnetty usein KNX-pohjaisia ohjauksia ja KNX-protokollaa tukevia laitteita. Valaistus on usein toteutettu DALI-protokollaa tukevilla valaisimilla, jotka kyetään liittämään osaksi älysähköjärjestelmää. Muutamassa hankkeessa on osallistuttu reservimarkkinoille tai hyödynnetty aggregointia. Kyselyssä kävi ilmi, että laajan kysyntäjoustohankkeen toteuttaminen käy usein liian monimutkaiseksi ja aikaa vieväksi, jos kaikki rakennuksen laitteet pyritään automatisoimaan. Helpompaa on hyödyntää isoja järjestelmiä, kuten akustoja tai lämmitysjärjestelmää, jotka ovat isoissa rakennuskohteissa yksinään tai aggregoituna riittävän isoja osallistumaan reservimarkkinoille, ja joiden ohjauksen toteutus on suhteellisen yksinkertaista.

8 Kiinteistön kysyntäjouston suunnitteluprosessin kehittäminen

Kyselytutkimuksen perusteella kysyntäjoustoon varaudutaan sähkösuunnittelussa jo nykyisellään jonkin verran, mutta kysyntäjouston suunnitteluprosessissa on vielä kehitettävää. Suunnittelijoilla on oltava riittävä asiantuntemus kysyntäjoustoon liittyen, jotta sen läpivienti projekteissa on mahdollista. Kuvassa 23. on esitetty VTT:n ToVa-käsikirjan mukainen suunnitteluratkaisujen kehittämisen, arvioinnin ja hyväksynnän rakenne, jota käytetään kysyntäjouston suunnitteluprosessin kehittämisen apuna.



Kuva 16. suunnitteluratkaisujen kehittämisen, arvioinnin ja hyväksynnän rakenne (Pietiläinen, 2007)

Seuraavassa luvussa käydään selkeyden vuoksi kuvassa 23. näkyvän suunnitteluratkaisujen kehitysprosessin suunnitteluvaiheet tarkemmin läpi.

8.1 Rakennusten suunnittelun vaiheet

Ramboll käyttää suunnittelun pohjana taloteknisen suunnittelun tehtäväluetteloa TATE18. Tehtäväluettelon avulla voidaan hankekohtaisesti valita suunnittelutehtävien suorittajat ja sitä käytetään tehtävälaajuuden määrityksessä, suunnittelukokonaisuuden hallinnassa ja osana suunnittelun laadun varmistusta. (Rakennustieto, 2017)

Tarveselvitysvaiheessa arvioidaan tilahankinnan tarpeellisuutta tai olemassa olevan tilan muutostarvetta. Tarkoituksena on kuvata alustavasti projektin tilatarpeet, sekä niille asetettavat vaatimukset. Tarveselvityksessä myös tutkitaan tilojen vaihtoehtoiset käyttömahdollisuudet sekä

arvioidaan eri suunnitteluratkaisujen kustannuksia alustavasti. Yleisesti ottaen tarveselvitysvaiheessa määritellään hankkeen suunnitteluraamit ja perusolemus. (Rakennustieto, 2017)

Rakennuslupatehtävät-vaiheessa käydään läpi hankkeen edellyttämät lupamenettelyt ja avustetaan rakennuslupahakemuksen tekemisessä. Lisäksi selvitetään hankkeeseen osallistuvien henkilöiden kelpoisuus ja pääpiirustusten hyväksyttävyys. (Rakennustieto, 2017)

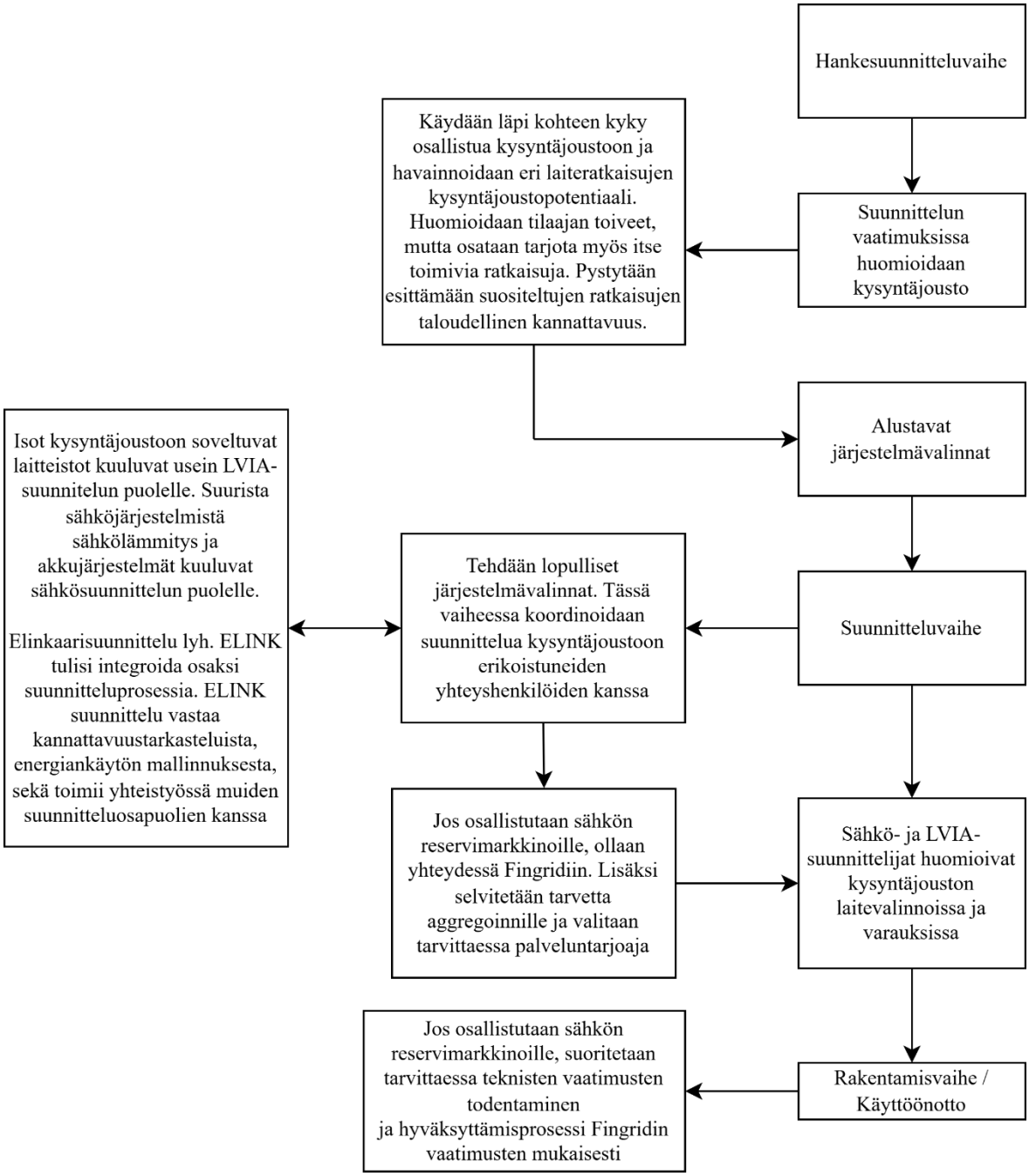
Toteutussuunnitteluvaiheessa hankkeen yleissuunnitelma jalostetaan mitoitetuiksi suunnitelmiksi ja tuotemäärityksiksi. Toteutussuunnitteluvaihe jakautuu kahteen vaiheeseen: Hankintasuunnitteluun ja toteutussuunnitteluun. Hankintasuunnittelun tarkoituksena on saattaa suunnittelu siihen vaiheeseen, että kohteen laajuus, tuotteiden määrät, työtavat ja yleinen laatutaso voidaan huomioida riittävällä tarkkuudella kustannuslaskelmissa. (Rakennustieto, 2017) Toteutussuunnitteluvaiheessa täydennetään hankintasuunnitteluvaiheesta puuttuneet kohdat ja tarkoituksena on luoda asennuskelpoiset suunnitelmat.

Rakentamisvaiheessa rakennetaan suunniteltu kohde ja se alkaa *rakentamisen valmistelulla*. Tähän kuuluu rakentamisen organisointi, kuten aikataulutus ja resurssointi. Tilaajan tehtävänä on varmistaa, että urakoitsijalle on varattu tarpeeksi aikaa rakentamisen valmisteluun. Organisoinnin lisäksi kilpailutetaan rakentamistehtävät, käydään sopimusneuvottelut ja laaditaan hankinta- ja urakkasopimukset. Rakentamisen aikana varmistetaan toteutuksen suunnitelmanmukaisuus ja tavoitteet täyttävä lopputulos, sekä varmistetaan että loppukäyttäjällä on rakennuksen tarvittavat käyttö- ja ylläpitovalmiudet. Rakentamisvaiheen päätteeksi syntyy vastaanottopäätös ja urakan vastaanotto. (Rakennustieto, 2017)

8.2 Suunnitteluratkaisujen kehittäminen

Kyselytutkimuksessa selvisi, että sähkösuunnittelijat ovat kuulleet kysyntäjoustosta ja tietävät siihen liittyvistä laiteratkaisuista, mutta sähkösuunnittelijoiden puolelta ei aktiivisesti ajeta kysyntäjoustoratkaisuja eteenpäin. Kyselyn perusteella sähkösuunnittelussa kysyntäjousto voidaan huomioida laitevalinnoissa esimerkiksi suunnittelemalla tarvittavat laitevaraukset, sekä valitsemalla laitteita, joilla on kyky osallistua kysyntäjoustoon. Suunnittelijoiden järjestelmätuntemusta parantamalla voitaisiin edistää esimerkiksi koulutuksilla tai infoilla, joissa tuotaisiin esille vaihtoehtoisia ratkaisuja nykyisten tilalle. Kyselytutkimuksen ja oman kokemuksen perusteella suunnittelussa edetään usein hyväksi havaituilla ratkaisuilla, joiden toteuttaminen on nopeaa ja, jonka toiminnan suunnittelija ymmärtää.

Rambollin omilla sivuilla sähkösuunnittelijoiden asiantuntemukseksi on listattu korkeajännitejärjestelmät, pienjännitejärjestelmät, varavirtajärjestelmät, generaattorit, rakennusakut, maadoitus- ja ukkosuojausjärjestelmät, palonilmaisujärjestelmät, turvallisuus- ja kulunvalvontajärjestelmät, IT- ja viestintäverkot, hissit, prosessijärjestelmät, kytkinkaappien kytkinlaitteet, automaatiokaapit ja PLC-järjestelmät. LVIA-suunnittelijat ovat vastuussa lämmitysjärjestelmästä, ilmanvaihtojärjestelmästä, ilmastoinnista ja näihin liittyvästä rakennusautomaatiosuunnittelusta. (Ramboll, 2025) Sähkösuunnittelun, energiasuunnittelun ja LVIA-suunnittelun rajat ovat häilyvät kysyntäjouston osalta ja molempien suunnittelualojen ohjeistukseen olisikin hyvä saada samat vaatimukset kysyntäjouston huomioimisesta. Tämä on tunnistettu myös Tampereen teknillisen yliopiston, Tampereen ammattikorkeakoulun ja LUT-yliopiston tekemässä kysyntäjoustoselvityksessä, jossa havaittiin, että sähkösuunnittelulle ei ole asetettu yhtä tiukkoja vaatimuksia kysyntäjoustoon osallistumiselle kuin LVI-järjestelmille. Tästä syytä sähkösuunnittelussa ei aina huomioida kysyntäjoustoratkaisuja. (Järventausta et al., 2015). Kuvan 24. vuokaaviossa on toimenpide-ehdotus kysyntäjouston suunnittelun tehostamisesta rakennushankkeen vaiheissa, jossa on huomioitu aiemmin havaitut puutteet.



Kuva 17. Kysyntäjouston suunnitteluprosessin kehittämisen toimenpide-ehdotukset

Hankesuunnitteluvaiheessa voidaan esittää alustavasti erilaisia järjestelmäratkaisuja. Järjestelmille ei tehdä tarkempaa suunnittelua vaan ratkaisut perustuvat aiempaa tietoon ja esimerkiksi monitavoiteoptimoinnilla voidaan tehdä alustavia järjestelmävalintoja. Tässä työssä tehtävässä case-tutkimuksessa kartoitetaan maalämpö-lämmitysjärjestelmän tukilämmityksenä toimivan sähkökattilan kannattavuutta reservimarkkinoilla ja tutkimuksen tuloksia voidaan hyödyntää tulevissa hankkeissa laitteistovalinnan perustana. Samanlaisia selvityksiä olisi hyvä tehdä

myös muille kysyntäjoustoon osallistuville järjestelmille, jotta niitä voitaisiin tuotteistaa ja tarjota helpommin tilaajalle.

Kun hankevaiheen alustavat laitevalinnat on tehty, siirrytään suunnitteluvaiheeseen. Suunnitteluvaiheessa tehdään lopulliset järjestelmävalinnat ja tehdään niihin tarvittava suunnittelutyö. Kysyntäjouston toteutuksen kannalta tässä vaiheessa on todella tärkeää, että projektissa on osaava henkilöstö mukana. Suunnitteluvaiheessa on viimeistään tunnistettava rakennushankkeen järjestelmien kyky osallistua kysyntäjoustoon. Lisäksi mikäli Ramboll tarjoaa mahdollisuutta osallistua reservimarkkinoille, on sen tunnistettava mahdolliset markkinapaikat, sekä kyettävä tuomaan järjestelmä markkinoille. Sähkön reservimarkkinoille voidaan osallistua suoraan, jolloin tilaaja tai tilaajan valitsema osapuoli voivat valita välille toimijaksi reservimarkkinapalveluita tarjoavan yrityksen, joka kykenee aktivoimaan järjestelmän ilman tilaajan aktiivista ohjausta. Reservimarkkinoille osallistuttaessa prosessi alkaa yhteydenotolla Fingridiin, joka neuvoo käyttöönotossa ja ohjeistaa vaadituissa testeissä.

Kiinteistön suunnittelussa voidaan ottaa huomioon muita isoja kuormia tai tuotantolaitteita, kuten suora sähkölämmitys tai akkujärjestelmät osana joustoa. Kyselyhaastattelun perusteella kysyntäjouston suunnittelussa on parempi ehdottaa yksinkertaisempia ratkaisuja, kuin yrittää liittää kaikki talotekniset järjestelmät kysyntäjoustoon. Monimutkaiset järjestelmät luovat usein ongelmia, joiden ratkominen voi nostaa yllättävästi kustannuksia.

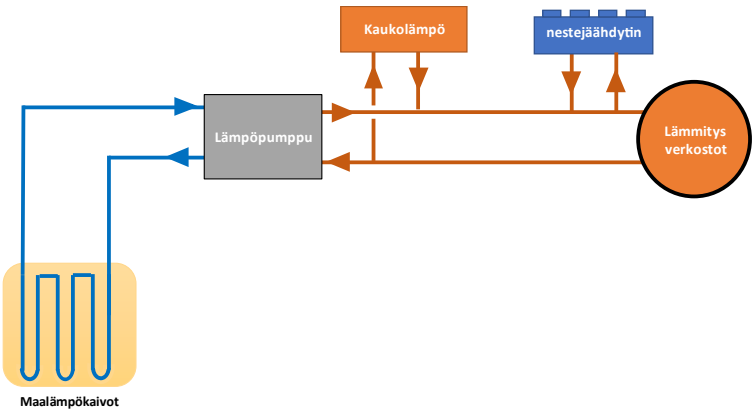
Tilaajalle voidaan ehdottaa myös aggregointipalvelun hyödyntämistä, jolloin yksittäisten joustokohteiden tehovaatimuksen ei tarvitse täyttyä. Olisi hyvä kartoittaa aggregointipalveluiden tarjoajia, jotta suunnitteluvaiheessa osattaisiin suoraan tarjota valmista ratkaisua.

9 Case-tutkimus: Lämpöpumppujärjestelmän tukilämmitysmuotona toimivan sähkökattilan tuotteistaminen kysyntäjoustoon

Tässä case-tutkimuksessa tutkitaan maalämmön tukilämmityksenä toimivan sähkökattilan liittämistä reservimarkkinoille. Tutkimus pohjautuu siihen, että nykyisellään sähkökattilat ovat ilman käyttöä suurimman osan vuodesta. Lämpöpumppujärjestelmät vaativat yleensä tukilämmitysmuodon, joka on yleisimmin kaukolämpö tai sähkökattila. Tukilämmitys on mitoitusteholtaan tyypillisesti suuri, mutta sille tulee käyttötunteja suhteellisen vähän. Tukilämmitys paikkaa primääristä lämmitystä vuoden kylmimpinä hetkinä, kun primäärisen lämmityksen teho ei riitä. Kun tukilämmitystä ei käytetä, voitaisiin sillä teoriassa osallistua sähkön reservimarkkinoille.

9.1 Case-kohteen tiedot

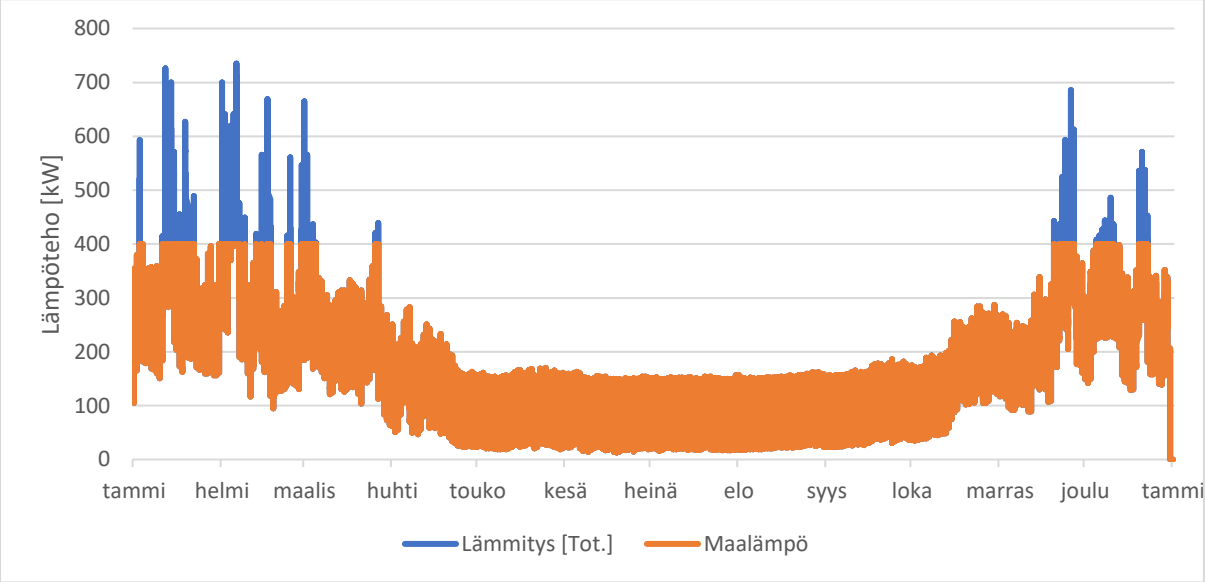
Case-tutkimuksessa käytetään Ramboll Finland Oy:n suunnittelemasta kerrostalokompleksista kerättyä dataa. Kerrostalokompleksi muodostuu kolmesta eri asuinrakennuksesta, joille on toteutettu yhteinen lämmitysratkaisu. Nykyinen lämmitysratkaisu on toteutettu kahdella maalämpöpumpuilla, joiden tukevana lämmitysmuotona on kaukolämpö. Lämpö otetaan energiakaivoista ja huippukulutuksen aikaan kaukolämpö toimii tukevana lämmitysmuotona. Kuvassa 15. on esitetty rakennuskohteen energiajärjestelmän toimintaperiaate



Kuva 18. Rakennuskohteen energiajärjestelmän toimintaperiaate.

Rakennuskohteen maalämpöpumppujen yhteenlaskettu sähköteho on 154 kW ja niiden tuottama laskennallinen lämpöteho on 400 kW.

Rakennuskohteen pääasiallisena lämmitysmuotona on maalämpö, jota kaukolämpö tukee tarvittaessa. Kuvassa 16. on esitetty rakennuskohteen lämpöpumppujen yhteenlaskettu laskennallinen lämmitystehontehon tuotto ja rakennuksen laskennallinen kokonaislämmitystehon tarve, johon tukilämmitysmuoto vastaa. Kuvassa 16. näkyvä lämmitystarpeen määrä on mallinnettu IDA ICE-ohjelmalla Ramboll Finland Oy:n toimesta.



Kuva 19. Rakennuskohteen lämmitystehon jakauma

Kuvasta huomataan, että maalämpö tarvitsee tukilämmitystä kylmien kuukausien aikana, mutta muuten tukilämmitys on käyttämättömänä. Mallinnuksen mukaan rakennuksen tukilämmitysmuodon käyttöaste on vuosittain 5 %, joka vastaa 439-käyttötuntia. Tämä mahdollistaa hyvin tukilämmityslaitteen, tässä tapauksessa sähkökattilan, hyödyntämisen kysyntäjoustossa. Rakennuksen kokonaislämmitysenergian tarve on 1492 MWh vuosittain.

9.2 Sähkökattilat

Sähkökattilalla tuotetaan lämmitysenergiaa lämmittämällä vettä sähköenergialla. Sähkökattilatyyppejä on kaksi erilaista: Vastuskattila ja elektrodikattila. Molemmat pohjautuvat samaan ideaan, mutta lämmitysmetodit ja käyttötarkoitukset eroavat toisistaan. Vastuskattilat ovat teknisesti hyvin yksinkertaisia, sillä niissä vettä lämmitetään suoraan sähkövastuksella. Vastuskattilat toimivat 400 V tai 690 V jännitteillä. Vastuskattilan kustannustehokkuus tippuu tehon

noustessa, sillä sähkökeskusten ja muuntajien koko kasvaa todella suureksi tehon kasvaessa. (Tiainen, 2024)

Suurempaa lämmitystehoa vaativiin kohteisiin valitaan yleensä elektrodikattila, jossa veden lämmitys perustuu veden sähkönjohtavuuteen. Sen sijaan, että vettä lämmitettäisiin erillisillä vastuksilla, vettä lämmitetään johtamalla siihen vaihtosähköä. Näin vesi toimii itse vastuksena. Elektrodikattiloilla voidaan tuottaa sekä lämmintä vettä, että höyryä- Elektrolyysin sivutuotteena vapautuu aina vetyä ja tämä on huomioitava suunnittelussa. Elektrodikattiloiden kannattavuuskynnys on noin 5 MW. (Tiainen, 2024)

Sähkökattilat voivat toimia rakennuksen pääasiallisena lämmitysratkaisuna, tai tukevana lämmitysmuotona. Pääasiallisena lämmitysmuotona sähkökattiloita käytetään lähinnä pienkiinteistöissä, joissa sähkönkulutus on pientä. Suuremmissa kohteissa lämmitysmuotona on joko kaukolämpö, tai lämpöpumput ja sähkökattila voidaan asentaa tukemaan järjestelmiä huippukuormien aikaan. Koska huippukuormitustilanteita ei ole paljoa, on sähkökattila usein käyttämättömänä ja tällöin sen olisi teoriassa mahdollista osallistua sähkön reservimarkkinoille.

Reservimarkkinoille voidaan osallistua molemmilla kattilatyypeillä riippuen niiden käyttötavasta. Valmiita ratkaisuja on jo markkinoilla tarjolla esimerkiksi Jäspiltä ja Finess Energyltä. Jäspi tarjoaa suoraan reservimarkkinoille räätälöityjä sähkökattiloita 1600 kW asti ja Finess maahantuo Norjalaisen Varmeteknikk:in kysyntäjoustoon kykeneviä vastuskattiloita 1200 kW asti. Jäspi markkinoi sähkökattiloita pääasiallisesti FCR-D markkinoille, mutta niillä on mahdollista osallistua myös mFRR, aFRR ja FFR-markkinoille.

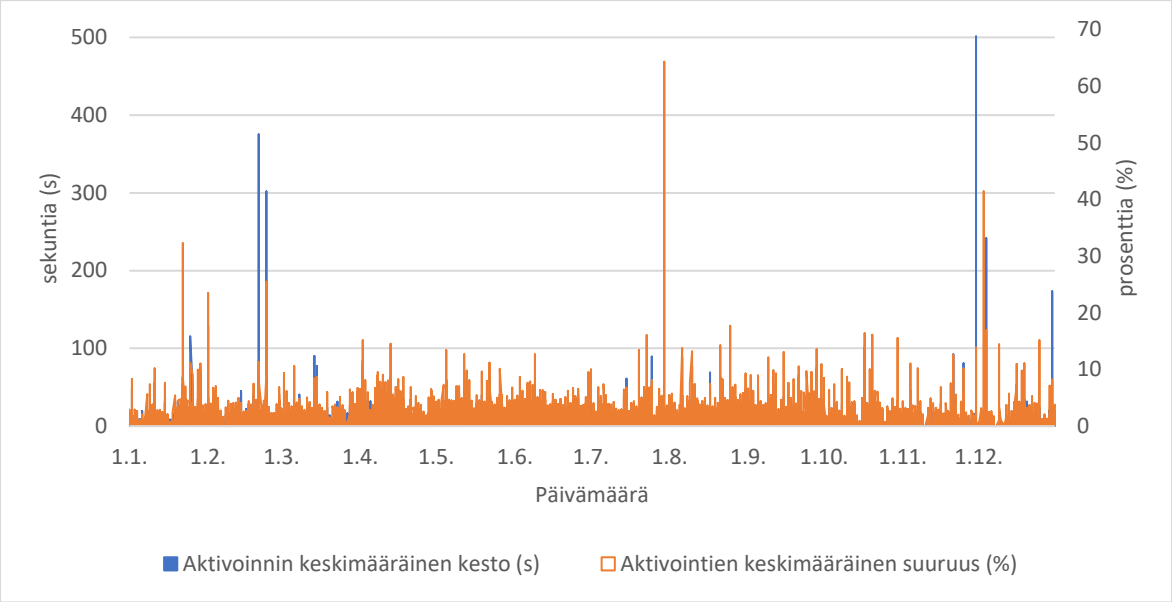
9.3 Python laskentatyökalut

Osana case-tutkimusta tehtiin laskentatyökalu, jolla Fingridin avointa dataa pystytään hyödyntämään FCR-D-markkinan analysoinnissa. Fingridin toimittama taajuusdata on 10 Hz:n taajuudella ja tarkasteltavasta ajasta riippuen tiedostojen koko muodostui merkittäväksi tehden Excelin käytön todella hitaaksi ja vaikeaksi. Datan käsittelyä varten muodostettiin Python työkalu, jolla on mahdollista yhdistää valitun vuoden tai kuukausien taajuusdata yhdeksi järjestelmän resurssivaatimuksiltaan kevyemmäksi parquet-tiedostoksi, jonka pohjalta laskenta voidaan suorittaa.

Työkalun toinen osa käsittelee taajuusdatan, muodostaen erilliset tiedostot FCR-D ylössäädölle ja FCR-D alassäädölle. Työkalu huomioi kunkin markkinapaikan rajataajuudet ja asettaa

rajataajuuden ulkopuoliset taajuusarvot tyhjäksi. Näin säilytetään alkuperäinen rivimäärä, ja aikaleimat.

Työkalun kolmas osa suorittaa laskennan. Työkalu laskee FCR-D ylössäädön ja FCR-D alassäädön halutut tiedot jokaiselle tunnille ja kasaa niistä lopulliset tiedostot analyysia varten. Työkalu antaa seuraavat tiedot: kokonaisaktivointikeston, korkeimman aktivoinnin suhteellisen kertoimen, aktivoinnin keskimääräisen suhteellisen kertoimen, sekä taajuuspoikkeaman suurimman arvon. Aktivoinnin kesto määräytyy rajataajuuden ulkopuolella olleesta taajuudesta ja aktivointitehon suhteellinen kerroin määräytyy taajuuspoikkeaman suuruuden mukaan. Case-laskuissa hyödynnetään vain FCR-D-alassäädölle työkalulla simuloituja lukuja. Kuvassa 18. on mallinnettu vuoden 2024 aikana tapahtuneiden FCR-D alassäätöaktivointien keskimääräinen kesto ja keskimääräinen suuruus työkalun avulla.

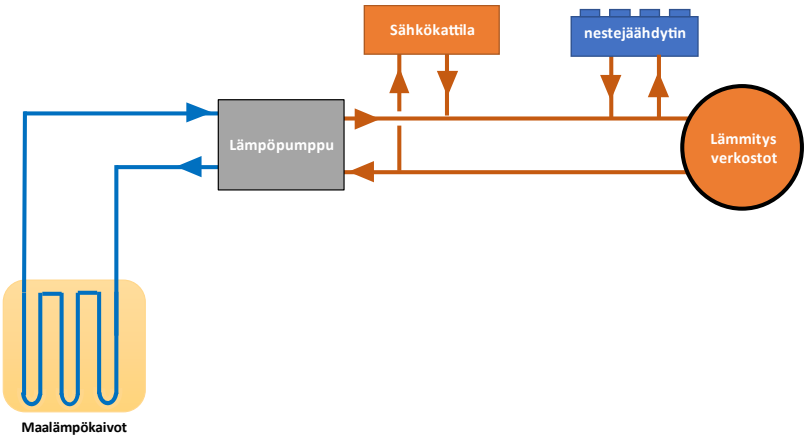


Kuva 20. FCR-D alassäädön aktivoinnit vuonna 2024

Aktivoinnit on laskettu alkamaan siitä pisteestä, kun rajataajuus ylitetään, alasäädössä 50,1 Hz, ja loppumaan kun taajuuden laskiessa rajataajuuden alle. Laskennan tulokset on esitetty tunnin aikaresoluutiolla. Laskennassa käytetty kuorma pystyy reagoimaan suoraan tehonmuutokseen ja palautumisaikaa ei tarvita.

9.4 Lämpöpumput, joilla tukilämmityksenä toimiva sähkökattila reservimarkkinoilla

Tarkastellaan kaukolämmön korvaamista sähkökattilalla. Sähkökattila asetetaan osaksi kiertoa kuvan 17. mukaisesti. Sen täytyy kyetä lämmittämään rakennusta, ja kyetä suorittamaan kysyntäjoustoa.



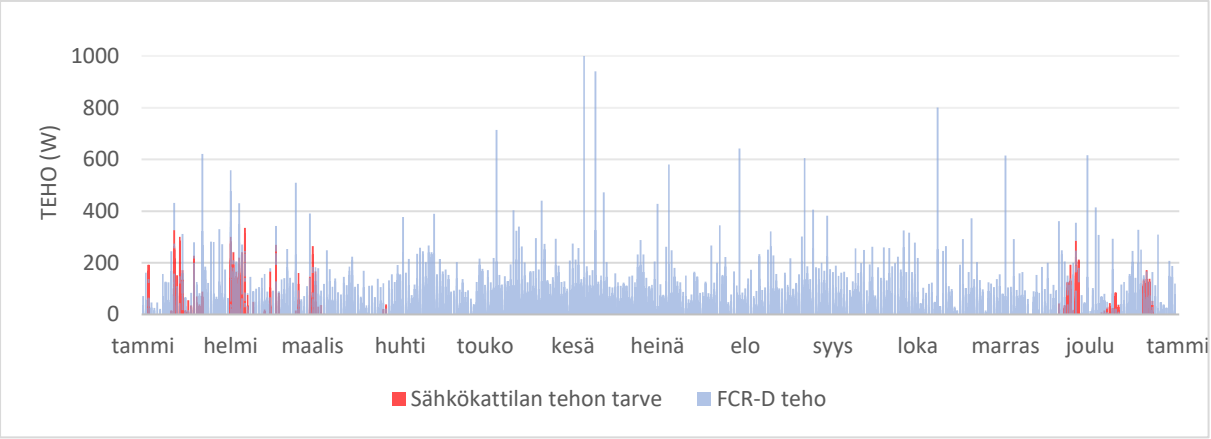
Kuva 21. Rakennuskohteen energiajärjestelmän toimintaperiaate sähkökattilan kanssa.

Jos sähkökattila suunnitellaan reservimarkkinoille osallistumista varten, on tärkeää varmistaa, että alassäätötilanteessa tuotettu ylimääräinen lämpö pystytään käsittelemään. Aktivointisignaalit ovat usein kestoltaan lyhyitä, mutta on varmistettava, että järjestelmä kykenee toimimaan tarvittaessa Fingridin asettamien ehtojen mukaisesti. Pisin aktivointiaika FCR-D alas, FCR-D ylös, FCR-N, aFFR alas, aFRR ylös, mFRR alas ja mFRR ylös markkinoille on 60 minuuttia ja FFR-markkinalla 30-sekuntia (Fingrid, 2025b). Rakennuksen nestetilavuuden on oltava tarpeeksi suuri, jotta ylimääräinen lämpö voidaan sitouttaa suoraan lämmityskiertoon tai on rakennettava jäähdytysjärjestelmä, kuten nestejäähdytys, joka varmistaa, ettei veden lämpötila nouse liian korkeaksi. Osa lämmöstä voidaan sitouttaa maalämpökaivoihin, joka parantaa lämpöpumppujärjestelmän suorituskykyä-

On myös huomioitava sähköliittymän kustannukset, jotka nousevat liittymän tehon noustessa. Suuremmissa rakennuskohteissa on usein keskijänniteliittymä, mutta pienemmissä rakennuskohteissa liittymän kasvattaminen pienjänniteliittymästä keskijänniteliittymäksi kasvattaa hankkeen kustannuksia merkittävästi.

Sähkökattilaa mitoitettaessa on otettava huomioon rakennuksen lämmityksen mitoitustehon tarve, sekä reservimarkkinoiden vaatimukset. Sähkökattilan on kyettävä lämmittämään rakennusta kysyntäjoustotilanteesta huolimatta ja vääränlainen mitoitus voi estää reservikapasiteetin

toimittamisen. Tällöin joudutaan maksamaan Fingridille korvausta toimittamattomasta reservikapasiteetista, joka on kolme kertaa reservimarkkinatuotteen markkinahinta. Jos korvaustilanteita tulee useasti, syö se investoinnin kannattavuutta ja pahimmillaan tuottaa tappioita. Kuvassa 19. on mallinnettu vuoden 2024 FCR-D alassäätö-markkinan aktivointeja ja niiden keskimääräisiä tehoja. FCR-D aktivointien teho on saatu käyttämällä suhteellista aktivointitehoa, joka on laskettu taajuuspoikkeaman suuruudesta. Aktivointien päälle on vielä lisätty laskennallinen sähkökattilan lämmitystehon tarve rakennuksen tiedoista.



Kuva 22. Sähkökattilan ja FCR-D alassäädön yhdistetty sähköteho vuonna 2024

Kuvasta havaitaan, että 1 MW tehoinen sähkökattila on kyennyt toimittamaan vaaditun kapasiteetin markkinoille, sekä lämmittämään rakennusta samaan aikaan. Vuoden aikana on kuitenkin ollut useita yli 50 % aktivointeja ja korkein aktivoinnin magnitudi on ollut 100 %. Jos näille hetkille olisi osunut merkittävästi lämmityskuormaa, olisi reservimarkkinoille tarjotun kapasiteetin määrää jouduttu rajoittamaan tai pahimmillaan jättää kapasiteetti toimittamatta.

Investointia suunniteltaessa voitaisiin esimerkiksi tehdä kustannus/riskianalyysi, jossa kartoitetaan rakennuksen vaatiman sähkötehon perusteella sähkökattilan minimiteho, jotta aiempien vuosien aktivointiprofiilien keskiarvolla pystyttäisiin vastaamaan sekä lämmitystehovaatimukseen, että tarjoamaan sähköä markkinoille optimaalisesti. Jos rakennuksen lämmitystarvetta pystytään ennustamaan sääennusteen perusteella, voitaisiin jättää tekemättä kapasiteettitarjous tuntimarkkinoille ja näin välttää korvauksen maksaminen.

9.5 Elinkaarilaskenta case-skenaarioille

Eri investointiskenaarioille suoritetaan kannattavuusanalyysi nykyarvomenetelmällä. Elinkaarilaskennassa case-kohteen kaukolämpöliittymä korvataan sähkökattilalla, joka lämmittämisen lisäksi osallistuu reservimarkkinoille. Laskennassa esitetään myös elinkaarikustannukset alkuperäiselle tilanteelle, jossa kaukolämpö toimii tukilämmitysmuotona, sekä tilanteelle, jossa sähkökattilalla ei osallistuta reservimarkkinoille. Näin saadaan hyvä käsitys sähkökattilalla reservimarkkinoille osallistumisen kannattavuudesta. Nykyarvon laskentaan käytetään kaavaa:

$$NPV = \sum_{t=1}^{n} \frac{S_t}{(1+r)^t} - I_0$$

, jossa *t* tarkoittaa nykyistä ajankohtaa, *r* reaalikorkokantaa, S_t investoinnin tuottamaa nettokassavirtaa ajan hetkellä *t* ja I_0 alkuinvestointia

Nykyarvon laskennassa käytetty reaalikorko saadaan kaavasta:

$$r = \frac{i-g}{1+g}$$

, jossa *i* tarkoittaa nimelliskorkoa ja *g* inflaatiotasoa

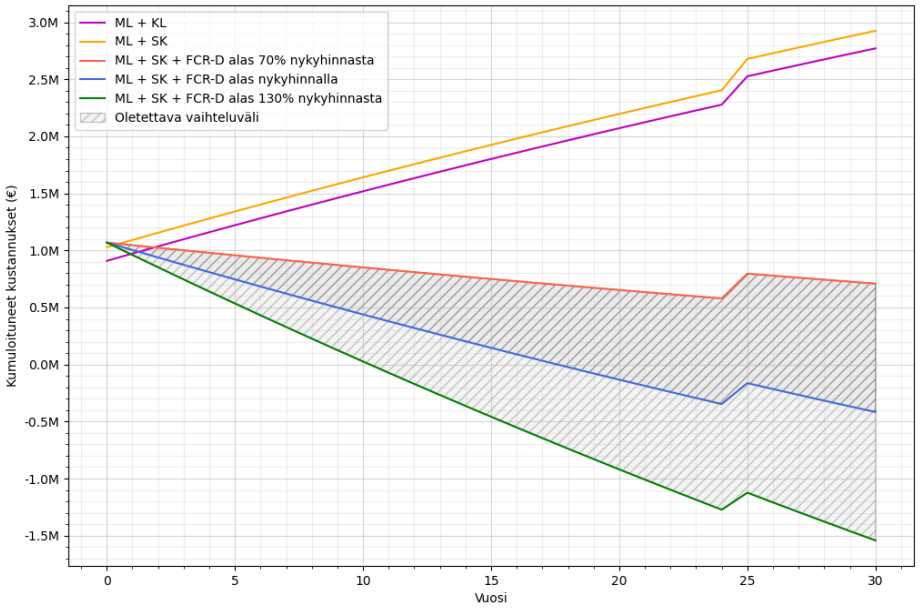
Seuraavissa luvuissa käydään läpi elinkaarilaskennan tulokset, sekä vertaillaan markkinapaikkojen kannattavuutta. Laskennassa sähkökattilan mitoitusteho on 800 kW ja reservimarkkinoille tarkoitetun sähkökattilan mitoitusteho on 1,1 MW, jotta sillä voidaan osallistua markkinoille. Nykyarvolaskennan parametreiksi on asetettu 3 % korkotaso ja 2 % inflaatio.

9.5.1 Sähkökattila FCR-D alassäätömarkkinalla

Otetaan tarkasteluun skenaario, jossa Jäspi FIL-SG 1100 sähkökattilalla osallistutaan FCR-D alassäätö-markkinalle. Sähkökattila kasvattaa rakennushankkeen lämmitysjärjestelmän investointikustannuksia merkittävästi kaukolämpöön verrattuna, sillä sähkönjakelussa joudutaan siirtymään pienjännitealueelta keskijännitealueelle. Hankkeen kustannusrakenne on esitetty liitteessä 1. Tämä tarkoittaa, että on varattava lisää teknistä tilaa laitteille, rakennutettava muuntaja, keskijännitekojeisto ja muut tarpeelliset tekniset laitteistot. Lisäksi reservimarkkinoille tarkoitettu sähkökattila maksaa enemmän kuin rakennuksen lämmitystarpeen mukaan mitoitettu sähkökattila. On myös investoitava

nestejäähdytysjärjestelmään, jotta rakennuksen käyttöveden lämpötila ei nouse liian suureksi pitkäkestoisen FCR-D aktivoinnin aikana. Nestekattila mitoitetaan sähkökattilan lämmitystehon mukaan.

Laskennassa huomioidaan rakennushankkeen kustannukset, FCR-D markkinan kapasiteettikorvaus ja FCR-D energiamaksut. FCR-D aktivointiprofiilin perusteella FCR-D alassäätömarkkinalla joustosta aiheutuva energiankulutus oli vuonna 2024 n. 6 MWh. Oletuksena on, että laitteiston käyttöaste on 90 %. Tehomaksun laskennassa lämmityskuorman päälle on lisätty kysyntäjoustosta aiheutuva suurin yhden tunnin keskimääräinen teho. FCR-D markkinalla laskennallisen aktivointiprofiilin mukaan vuoden 2024 kuukausien tuntien suurin teho oli keskimääräisesti 26 %, joka pyöristetään tässä laskennassa 30 % sähkökattilan kokonaistehosta. Kaikki markkinalle tarjottu kapasiteetti hyväksytään. Lisäksi tehdään herkkyysanalyysi FCR-D markkinan kapasiteettikorvauksen hinnanvaihtelusta 70 %-130 % hinnalla nykytasoon verrattuna. Kuvassa 21. on esitetty laskennan tulokset.



Kuva 23. Kustannusmallinnus FCR-D alassäätömarkkinalla toimivasta sähkökattilasta

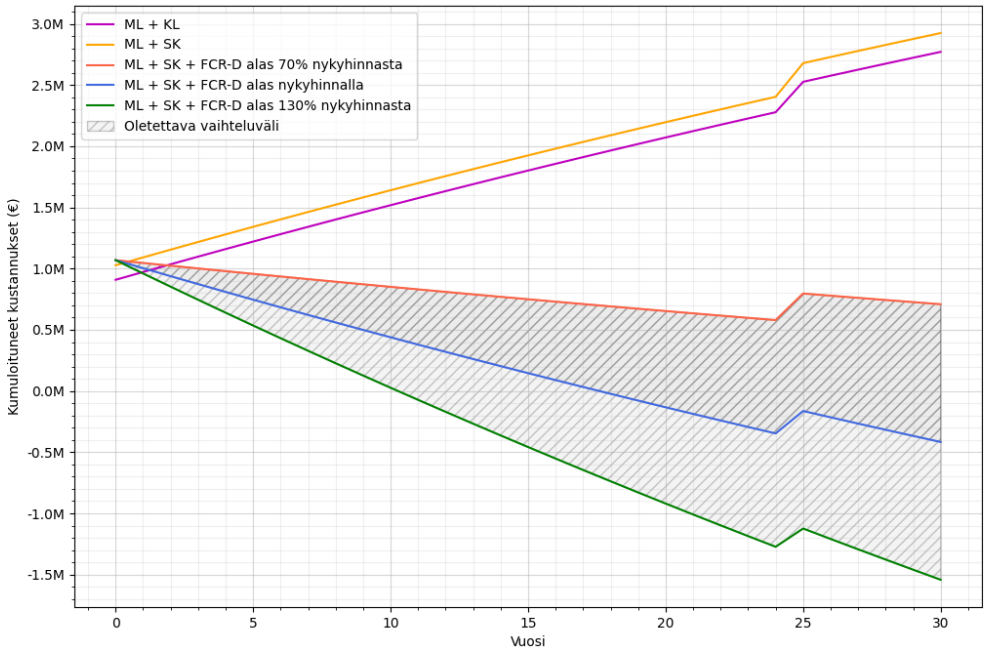
Kuvasta havaitaan, että sähkökattila tuottaa parhaassa tapauksessa voittoa ja vielä 30 % kapasiteettikorvauksen markkinahinnan pudotuksella investoinnin nykyarvo kasvaa. Numeroiden perusteella FCR-D markkinoille osallistuminen vaikuttaisi tässä tapauksessa olevan hyvin kannattava toimenpide ja sillä voitaisiin jopa kuolettaa

lämpöpumppujärjestelmän elinkaarikustannukset. On kuitenkin huomioitava, että laskennassa ei ole otettu huomioon läheskään kaikkia epävarmuustekijöitä, joista osalla on merkittävä vaikutus investoinnin kannattavuuteen. Esimerkiksi tehomaksu vaikuttaa merkittävästi kannattavuuteen, ja jos sen hinta nousee, sekä lisäksi tulee pitkäkestoisia FCR-D aktivointeja, voi investoinnin kannattavuus laskea. Lisäksi FCR-D kapasiteettimarkkinan hinnan kehitystä ei tässä työssä ole tarkemmin tutkittu vaan oletetaan Santeri Tirrosen tekemän selvityksen mukaan markkinoiden pysyvä kohtuullisen vakaana.

9.5.2 Sähkökattila aFRR-alassäätömarkkinalla

aFRR pyrkii FCR-D markkinan tapaan pitämään verkon taajuuden 49,9–50,1 Hz:n alueella. Erona FCR-D markkinaan on, se että aktivointi tapahtuu Fingridin ohjaussignaalilla oman mittauksen sijaan. Lisäksi jos markkinoille tarjotaan 1 MW kapasiteettia, aktivoituu se kokonaisuudessaan aktivoinnissa.

Laskennassa huomioidaan rakennushankkeen kustannukset ja aFRR-alassäätömarkkinan tuotto Fingridin reservimarkkinoiden tuottolaskurin mukaisesti. Oletuksena on, että laitteiston käyttöaste on 90 %. Tehomaksun laskennassa lämmityskuorman päälle on lisätty kysyntäjoustosta aiheutuva suurin yhden tunnin keskimääräinen teho. aFRR aktivoinnit on laskettu 1 MW suuruudella ja laskenta on suoritettu Fingridin toimittaman aktivointisignaalin historiatiedon perusteella. Laskennassa tehdään oletus, että kaikki markkinalle tarjottu kapasiteetti hyväksytään. Lisäksi tehdään herkkyysanalyysi markkinatuotolle 70 %-130 % välille nykytasosta. FCR-D-alassäädön tapaan myös aFRR markkinalle osallistuttaessa on lämmitysjärjestelmän osaksi lisättävä nestejäähdytin, joka mitoitetaan sähkökattilan tehon mukaan. Kuvassa 22. on esitetty laskennan tulokset.



Kuva 24. Kustannusmallinnus aFRR-alassäätömarkkinalla toimivasta sähkökattilasta

aFRR-alassäätömarkkina näyttää kuvaajan perusteella tarjoavan isompaa tuottoa FCR-D markkinaan verrattuna, vaikka 1 MW vähimmäisaktivointitehon myötä sähköenergian kustannukset ovat korkeammat kuin FCR-D alassäätömarkkinalla. Tässäkin laskennassa on kuitenkin huomioitava, että kaikkia epävarmuustekijöitä ei ole otettu laskennassa huomioon. Lisäksi oletus siitä, että jokainen energiatarjous hyväksytään ei välttämättä vastaa oikeaa tilannetta ja tällä on myös suora vaikutus kannattavuuteen. Kuvaaja antaa kuitenkin hyvän käsityksen siitä, että reservimarkkinoille osallistumalla voidaan kasvattaa investoinnin nykyarvoa ja parhaassa mahdollisessa tapauksessa jopa kuolettaa investointi.

9.5.3 Sähkökattila FFR, mFRR ja aFRR markkinoilla

Sähkökattilan tapauksessa FFR-markkinalle osallistuminen ei ole järkevää, sillä FFR-markkinalle pääsee osallistumaan vain ylössäädöllä. Lämmitystehon pudottaminen ei sähkökattilalla ole järkevää, sillä sen primäärinen tarkoitus on aktivoitua lisälämmityksen tarpeessa eikä sillä ole ylläpitotehoa.

mFRR ei myöskään ole tässä case-kohteessa, sekä oletettavasti muissa vastaavissa kohteissa järkevä ratkaisu kysyntäjouston toteutukseen sen aktivointitavan takia. Aktivointi

ei tapahdu automaattisesti Fingridin ohjaussignaalin perusteella tai omaan mittaukseen perustuen vaan se tehdään Fingridin lähettämän elektronisen sanoman perusteella. Tämä sopii hyvin esimerkiksi teollisuuskohteisiin, joissa laitteita hallitaan jatkuvasti valvomosta, mutta ei itsenäisesti toimiviin järjestelmiin.

10 Johtopäätökset

Tämän diplomityön tarkoituksena oli selvittää Ramboll Finland Oy:n kysyntäjouston suunnittelun nykytila, sekä kehittää kysyntäjouston huomioimista osana suunnitteluprosessia. Työn teoriaosuudessa käytiin läpi reservimarkkinoiden toimintaa, kysyntäjoustoa käsitteenä, sen käytännön toteutusta ja siihen liittyvää laitteistoa, kysyntäjouston suunnitteluprosessin kehittämisen pohjaksi. Teoriaosuudessa keskityttiin erityisesti FCR-D markkinaan, jolle case-tutkimuksessa muodostettiin aktivointiprofiili ja tehtiin useita Python-pohjaisia laskentatyökaluja. Teoriaosuudessa käytiin myös kattavasti läpi kysyntäjoustoon liitettäviä resursseja ja niiden kysyntäjoustopotentiaalia, jotta niiden huomioiminen suunnittelussa olisi helpompaa. Lopputuloksena oli, että lämmityskuormat, ilmanvaihto ja rakennusten akkujärjestelmät sopivat parhaiten kysyntäjoustoon niiden suuren tehon ja helpon ohjauksen vuoksi. Myös muita kuormia voidaan liittää kysyntäjoustoon, mutta kyselytutkimuksen perusteella liian monimutkainen kysyntäjoustosuunnittelu voi johtaa ongelmiin.

Suunnitteluprosessin kehittämistä varten teetettiin kyselytutkimus, jota käytettiin kysyntäjoustosuunnittelun nykytilan havainnollistamiseen. Kyselytutkimuksessa selvisi, että sähkösuunnittelijoilla ja projektipäälliköillä on suurten rakennusten ja teollisen rakentamisen yksikössä hyvä yleiskäsitys kysyntäjoustosta, mutta puutteellisen standardoinnin ja vaatimusten takia kysyntäjouston suunnittelu on harvoin proaktiivista.

Kyselytutkimukseen perustuen luotiin kehitysideoita kysyntäjouston suunnitteluprosessin kehittämiseksi. Tärkeimpänä huomiona oli kyselytutkimuksessa ja teoriakatsauksessa havaittu alan standardoinnin puute, joka vaikeuttaa kysyntäjouston suunnittelua. Kehitysehdotuksena esitetään kysyntäjouston huomioimisen vaatimista hankkeiden tehtäväluettelossa, jotta jokaisessa rakennushankkeessa selvitettäisiin kohteen kyky kysyntäjoustoon. Lisäksi ehdotetaan, että yrityksellä olisi hyvä olla yhteyshenkilöt, joihin voi olla yhteydessä kysyntäjoustoon liittyvissä kysymyksissä, jotta hankkeisiin saadaan aina osaava henkilö mukaan.

Case-tutkimuksessa määritettiin Helsingissä sijaitsevan rakennuskohteen maalämpö-lämmitysjärjestelmän tukilämmitysmuotona toimivan sähkökattilan teoreettinen kysyntäjoustopotentiaali. Tutkimuksessa simuloitiin kysyntäjoustoon tarkoitetun sähkökattilan liittämistä reservimarkkinoille. Tutkimuksessa kehitettiin Python laskentatyökalut FCR-D taajuusdatan käsittelyyn, sekä kysyntäjoustoprofiilin muodostamiseen. FCR-D ja aFRR markkinoista tehtiin

kustannusmallinnus perustuen Ramboll Finland Oy:lta saatuihin kustannustietoihin. Kustannusmallinnuksen avulla havainnollistettiin reservimarkkinoille osallistumisen kannattavuutta, jotta sen käyttöönotolle olisi perusteita tulevaisuudessa. Kustannusanalyysin johtopäätöksenä oli, että maalämpö-lämmitysjärjestelmän tukilämmitysmuotona toimivan sähkökattilan liittäminen reservimarkkinoille vaikuttaa kannattavalta lisäinvestoinneista huolimatta ja saattaa parhaassa tapauksessa jopa kuolettaa lämmitysjärjestelmät investoinnit. Lisäksi saatiin esimerkki tuleviin vastaaviin rakennuskohteisiin.

10.1 Pohdintaa ja kehitysideoita

Työssä mallinnettiin FCR-D ja aFRR markkinoiden kannattavuutta. FCR-D markkinalle muodostettiin aktivointiprofiili perustuen Fingridin avoimeen dataan ja tästä aktivointiprofiilista saatiin selville simuloitu teho ja valitun jakson kysyntäjoustoon käytetyn sähköenergian määrä. Aktivointiprofiilin avulla pystyttiin tarkastelemaan sähkön tehomaksun vaikutusta kustannuksiin, jolla on merkittävä vaikutus alassäätötilanteessa. aFRR-markkinalle tällaista aktivointiprofiilia ei kyetty muodostamaan puutteellisen datan takia, joten jouduttiin tekemään oletuksia aktivointitehon suhteen. Näin ollen suoraa vertailua FCR-D ja aFRR markkinoiden kannattavuuden välille ei saatu tehtyä ja tästä olisi mielenkiintoista tehdä jatkotutkimusta. aFRR-markkinalla jousto aktivoituu hintajärjestyksessä, joten tätä markkinapaikkaa mallinnettaessa olisi muodostettava rajahinnan mukaan teoreettinen aktivointiprofiili. Jos kysyntäjouston suunnittelua saataisiin edistettyä tulevaisuudessa eri hankkeissa, voitaisiin näistä kertyneestä datasta tehdä jatkotutkimusta ja määrittää tarkemmin eri vaihtoehtojen kannattavuutta.

Lähteet

Afry (2024) Kuormanohjausrajapinnan Määrittel. [Viitattu 4.2 2025] [Saatavissa: https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/sahkomarkkinat/kysyntajousto/kuormanohjausrajapinnan-maarittely---loppuraportti.pdf].

Astero Pja Evens C (2021) Optimum day-ahead bidding profiles of electrical vehicle charging stations in FCR markets. Electric Power Systems Research 190: 106667.

Elisa (2023) Elisan Virtuaalinen Voimalaitos (DES) Laajentaa Toimintaansa Suomen Sähköreservimarkkinoilla. [Viitattu 19.3 2025] [Saatavissa: https://elisa.fi/yhtiotieto/uutishuone/tiedotteet/elisan-virtuaalinen-voimalaitos-(des)-laajentaa-toimintaansa-suomen-s%C3%A4hk%C3%B6reservimarkkinoilla/52334863694316/].

Energiavirasto (2025) Sähkön Mittaus. [Viitattu 31.1 2025] [Saatavissa: https://energiavirasto.fi/sahkon-mittaus].

Energiavirasto (2024) Reservitoimittajia Koskevien Ehtojen Vahvistaminen. [Viitattu 14.1 2025] [Saatavissa: https://energiavirasto.fi/documents/11120570/12872579/P%C3%A4%C3%A4t%C3%B6s+mFRR-markkinaehtojen+vahvistamisesta,+Fingrid+Oyj.pdf/5e6a92cb-7cd7-85a7-db0e-34b09f00090e/P%C3%A4%C3%A4t%C3%B6s+mFRR-markkinaehtojen+vahvistamisesta,+Fingrid+Oyj.pdf?version=1.2&t=1728898002306].

eSett (2023) Pohjoismaisen Taseselvityksen Käsikirja. [Viitattu 5.5 2025] [Saatavissa: https://www.esett.com/app/uploads/2023/04/NBS-Kasikirja-Suomi-4.3.pdf].

EU-neuvosto (2024) 55-Valmiuspaketti. [Viitattu 14.1 2025] [Saatavissa: https://www.consilium.europa.eu/fi/policies/fit-for-55/].

Fingrid (2025a) Kulutusjousto. [Viitattu 19.2 2025] [Saatavissa: https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/markkinoiden-yhtenaisyys/sahkomarkkinoiden-kehityshankkeet/kysyntajousto/].

Fingrid (2025b) Reservimarkkinat. [Viitattu 14.1 2025] [Saatavissa: https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/#reservivelvoitteet-ja-hankintakanavat].

Fingrid (2025c) Nopea Taajuusreservi (FFR). [Viitattu 4.2 2025] [Saatavissa: https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/nopea-taajuusreservi/#tekniset-vaatimukset].

Fingrid (2025d) Ehdot Ja Edellytykset Manuaalisen Taajuuden Palautusreservin (mFRR) Toimittajalle. [Viitattu 14.1 2025] [Saatavissa: https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/sahkomarkkinat/reservit/liite-1-mfrr-ehdot-ja-edellytykset-mfrr-eam-voimaantulo-4.3.2025.pdf].

Fingrid (2025e) Automaattinen Taajuuden Palautusreservi (aFRR). [Viitattu 14.1 2025] [Saatavissa: https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/automaattinen-taajuudenhallintareservi/].

Fingrid (2025f) Reservikaupankäynti Ja Tiedonvaihto -Ohje. [Saatavissa: https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/sahkomarkkinat/reservit/fingridin-reservikaupankaynti-ja-tiedonvaihto--ohje.pdf].

Fingrid (2025g) Emergency and Restoration Verkkosääntö - Vaatimukset Ja Toimeenpano Suomessa. [Viitattu 18.3 2025] [Saatavissa: https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/sahkomarkkinat/verkkosaannot/nc-er-toimeenpano-perustietopaketti-julkinen.pdf].

Fingrid (2025h) Kuinka Osallistua Reservimarkkinoille. [Viitattu 13.5 2025] [Saatavissa: https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit/reservituotteet-ja-markkinoille-osallistuminen/kuinka-osallistua-reservimarkkinoille/].

Fingrid (2025i) Reservituottolaskuri. [Viitattu 4.6 2025] [Saatavissa: https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit/reservituotteet-ja-markkinoille-osallistuminen/reservituottolaskuri/].

Fingrid (2025j) Uudet Tasepalvelumaksut Astuvat Voimaan 1.1.2025. [Viitattu 5.5 2025] [Saatavissa: https://www.fingrid.fi/ajankohtaista/tiedotteet/2024/uudet-tasepalvelumaksut-astuvat-voimaan-1.1.2025/].

Fingrid (2024a) Suomen Sähköjärjestelmä. [Viitattu 14.1 2025] [Saatavissa: https://www.fingrid.fi/kantaverkko/kehittaminen/suomen-sahkojarjestelma/].

Fingrid (2024b) Osa Pohjoismaista Sähköjärjestelmää. [Viitattu 14.1 2025] [Saatavissa: https://www.fingrid.fi/kantaverkko/kehittaminen/pohjoismainen-sahkojarjestelma-ja-liitynnat-muihin-jarjestelmiin/].

Fingrid (2024c) Kulutuksen Kehitysnäkymät Q3 2024. [Viitattu 14.1 2025] [Saatavissa: https://www.fingrid.fi/kantaverkko/kehittaminen/sahkon-tuotannon-ja-kulutuksen-kehitys-nakymat/].

Fingrid (2024d) Sähkön Tuotannon Ja Kulutuksen Kehitysnäkymät. [Viitattu 11.11 2024] [Saatavissa: https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/tiedotteet/ajankohtaista/sahkon-tuotannon-ja-kulutuksen-kehitysnakymat-q3-2024-fingrid.pdf].

Fingrid (2024e) Sähkön Tuotannon Ja Kulutuksen Kehitysnäkymät. [Viitattu 14.1 2025] [Saatavissa: https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/tiedotteet/ajankohtaista/sahkon-tuotannon-ja-kulutuksen-kehitysnakymat-q3-2024-fingrid.pdf].

Fingrid (2024f) Itsenäinen Aggregointi. [Viitattu 14.1 2025] [Saatavissa: https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/markkinoiden-yhtenaisyys/sahkomarkkinoiden-kehityshankkeet/itsenainen-aggregointi/].

Fingrid (2024g) Taajuusohjattu Käyttö- Ja Häiriöreservi (FCR-Tuotteet). [Viitattu 14.1 2025] [Saatavissa: https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/taajuusohjattu-kaytto--ja-hairioreservi/#tekniset-vaatimukset].

Fingrid (2015) Fingrid Oyj:N Lehti Numero 3 2015. [Viitattu 17.2 2025] [Saatavissa: https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/julkaisut/asiakaslehdet/116139-fingrid-3-2015-fin-lr.pdf].

Finlex (2023) Laki Sähkömarkkinalain Muuttamisesta. [Saatavissa: https://finlex.fi/fi/lainsaadanto/saadoskokoelma/2023/497#OT0].

Finlex (2021) Valtioneuvoston Asetus

Sähköntoimitusten Selvityksestä Ja Mittauksesta. [Viitattu 31.1 2025] [Saatavissa: https://finlex.fi/fi/laki/alkup/2021/20210767#Pidm46263582367744].

IEA (2023) Demand Response. [Viitattu 19.2 2025] [Saatavissa: https://www.iea.org/energy-system/energy-efficiency-and-demand/demand-response].

IPCC (2023) A Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

Järventausta P, Repo S, Trygg P, Rautiainen A, Mutanen A, Lummi K, Supponen A, Heljo J, Sorri J, Harsia P, et al. (2015) Kysynnan jousto loppuraportti.

Jokiniemi J (2014) Sähkön Kysyntäjoustokohteiden Mahdollisuudet Suomen Teollisuudessa.

Ketomäki J (2022) Rakennusten älyindikaattori Smart readiness indicator (SRI).

Manninen K (2017) Rakennuksen Kysyntäjoustomallinnuksen Vaatimusten Määritys.

Motiva (2025) Rakennusten Älyindikaattori – Smart Readiness Indicator (SRI). [Viitattu 5.3 2025] [Saatavissa: https://www.motiva.fi/ratkaisut/ohjauskeinot/rakennusten_alyindikaattori].

Motiva (2024) Uusiutuva Energia Suomessa. [Viitattu 14.1 2025] [Saatavissa: https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/uusiutuva_energia_suomessa].

Neoen (2023) Neoen Aloittaa Suomessa Kapasiteetiltaan Pohjoismaiden Suurimman Akkuvaraston Rakentamisen. [Viitattu 17.2 2025] [Saatavissa: https://finland.neoen.com/fi/uutiset/2023/neoen-aloittaa-suomessa-kapasiteetiltaan-pohjoismaiden-suurimman-akkuvaraston-rakentamisen/].

Partanen J, Annala S, Lassila J, Honkapuro S ja Jaanto J, (2023) Sähkömarkkinat - Opetusmoniste. [Viitattu Oct 16 2024] [Saatavissa: https://moodle.lut.fi/pluginfile.php/1789935/mod_resource/content/0/S%C3%A4hk%C3%B6markkinat-opetusmoniste%202023.pdf].

Pietiläinen J (2007) ToVa-Käsikirja : Rakennuksen Toimivuuden Varmistaminen Energiatehokkuuden Ja Sisäilmaston Kannalta. Espoo: VTT.

Puusa A, Juuti P ja Aaltio I (2020) Laadullisen Tutkimuksen Näkökulmat Ja Menetelmät. Helsinki: Gaudeamus.

Pyykkö T (2020) Valaistusjärjestelmän Potentiaali Kysyntäjoustossa.

Rakennustieto (2017) Taloteknisen Suunnittelun Tehtäväluettelo Tate18. [Viitattu 6.3 2025].

Ramboll (2025) LVIA- Ja Sähkösuunnittelu. [Viitattu 12.5 2025] [Saatavissa: https://www.ramboll.com/fi-fi/tekninen-suunnittelu/lvia-ja-sahkosuunnittelu].

Sello (2019) 2 500 Aurinkopaneelia Ja Pohjois-Euroopan Suurin Kiinteistöön Sulautettu Sähkövarasto – Sellon Energiajärjestelmä Tuo Säästöjä Koko Yhteiskunnalle. [Viitattu 17.2 2025] [Saatavissa: https://www.sello.fi/info/ajankohtaista/2-500-aurinkopaneelia-ja-pohjois-euroopan-suurin-kiinteistoon-sulautettu].

Sesko (2023) Artikkelit Asiantuntijat 4.9.2023 Kaksisuuntainen Lataus, Sähköauto Sähkövarastona? [Viitattu 17.2 2025] [Saatavissa: https://sesko.fi/kaksisuuntainen-lataus-sahkoauto-sahkovarastona/].

SESKO (2022) Suositus Sähköenergiamittareiden Paikallista Asiakasrajapintaa Varten. [Viitattu 3.2 2025] [Saatavissa: https://sesko.fi/wp-content/uploads/2022/12/Suositus-SK-13-1_H1-asiakasrajapinta_suomenkielinen_2022-12-13.pdf].

Soikkeli A (2022) Aggregaattorimallien Liiketoimintapotentiaali Ja Edellytykset Energiayhtiössä.

Stanelyte D, Radziukyniene N ja Radziukynas V (2022) Overview of Demand-Response Services: A Review. Energies 15(5).

Suni T (2024) Suunnitteluohje Julkisten Kiinteistöjen Kulutusmittarointiin.

Tenhunen H (2022) Älykkään Energianhallinnan Hyödyt Okt-Kokoluokassa.

Tiainen L (2024) Elektrodikattilan Ja Kaukolämpöakun Kannattavuus Vastapainetuotannossa. [Saatavissa: https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/168230/DI_Lauri_Tiainen_valmis_01.pdf?sequence=1&isAllowed=y].

Vibeco (2025) Vastuulliset Kiinteistöt Ovat Tuottavia Ja Edistävät Kestävää Kehitystä. [Viitattu 19.3 2025] [Saatavissa: https://vibeco.fi/referenssit/].

Virtanen L (2020) Tasejärjestelmän Muutoksen Vaikutukset Pohjoismaisilla Sähkömarkkinoilla.

Yle (2024) Euroopan metropoleista loppuu tila – se on tuomassa Suomeen datakeskusten buumin ja miljardeja.

Yle (2023) Virtuaalivoimala Maksoi Itsensä Takaisin Etuajassa Ja Tuottaa Jo Rahaa Kaupungille – Sähköauton Omistaja Voi Kohta Päästä Mukaan Apajille. [Viitattu 17.3 2025] [Saatavissa: https://yle.fi/a/74-20023156].

Liitteet

Toistuvat kustannukset	Maalämpö + kaukolämpö	Maalämpö + sähkökattila	Maalämpö + Sähkökattia + FCR-D alas	Maalämpö + Sähkökattia + aFRR alas
Kaukolämpö Energia + Tehomaksu, €	18 348 €			
Lämpöpumppujärjestelmän Energia + Tehomaksu, €	42 460 €	61 655 €	75 503 €	105 814.8 €
Energiajärjestelmän huoltokustannus €/a	3 500 €	3 000 €	3 000 €	3 000.0 €
Yhteensä vuosittaiset kustannukset	64 308 €	64 655 €	78 503 €	108 814.8 €
PTS-kustannus 25v. aikana (lämmitysjärjestelmän)	Maalämpö + kaukolämpö	Maalämpö + sähkökattila	Maalämpö + Sähkökattia + FCR-D alas	Maalämpö + Sähkökattia + aFRR alas
Kaukolämmön alakeskuksen uusinta, v. 25	18 200 €	- €	- €	- €
Sähkökattilan uusinta, v. 25	- €	44 200 €	55 220 €	55 220.0 €
MLP lämpöpumpun uusinta V.20	180 000 €	180 000 €	180 000 €	180 000.0 €
Yhteensä PTS kustannukset	198 200 €	224 200 €	235 220 €	235 220.0 €
Investointi	Maalämpö + kaukolämpö	Maalämpö + sähkökattila	Maalämpö + Sähkökattia + FCR-D alas	Maalämpö + Sähkökattia + aFRR alas
Kaukolämpö alakeskus	18 200 €			
Kaukolämpö liittymismaksu&kaivuumaksu	35 600 €			
Sähkökattila		44 200 €	55 220 €	55 220.0 €
Vedenjäähdytyskone			20 000 €	20 000.0 €
Varaajat, putket LJH:ssa ja siirtimet	50 000 €	50 000 €	50 000 €	50 000.0 €
Porakaivot (sis. Vaakavedot, kokoomakaivot, asennukset)	405 000 €	405 000 €	405 000 €	405 000.0 €
Sähkön liittymismaksu		28 370 €	39 008 €	39 008.2 €
Muuntaja+keskijännitekoneisto+muut tekniset laitteett		100 000 €	100 000 €	100 000.0 €
Maalämpöpumppu oilon p300 x2	400 000 €	400 000 €	400 000 €	400 000.0 €
Yhteensä investointikustannusarvio	908 800 €	1 027 570 €	1 069 228 €	1 069 228.2 €
Tuotto	Maalämpö + kaukolämpö	Maalämpö + sähkökattila	Maalämpö + Sähkökattia + FCR-D alas	Maalämpö + Sähkökattia + aFRR alas
			145 000.00 €	188 000.00 €

Liite 1. Kustannuslaskennan lähtötiedot