Virtuaalivoimalan taloudelliset vaikutukset ja strateginen merkitys julkisessa kiinteistökannassa

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Tuotantotalouden diplomityö

2026

Aleksis Kulta

Tarkastajat: Professori Timo Kärri

Tutkijatohtori Antti Yli-Kujala

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUTin insinööritieteiden tiedekunta

Tuotantotalous

Aleksis Kulta

Virtuaalivoimalan taloudelliset vaikutukset ja strateginen merkitys julkisessa kiinteistökannassa

Tuotantotalouden diplomityö

2026

107 sivua, 36 kuvaa, 14 taulukkoa ja 2 liitettä

Tarkastajat: Professori Timo Kärri ja Tutkijatohtori Antti Yli-Kujala

Avainsanat: virtuaalivoimala, energiamurros, resilienssi, sähkömarkkinat, reservimarkkinat, kiinteistöakku, hybridilämmitys, kysyntäjousto

Tämä diplomityö tarkastelee virtuaalivoimalan taloudellisia ja strategisia vaikutuksia julkisessa kiinteistökannassa. Tutkimuksen kohteena oleva virtuaalivoimala yhdistää sähköakuston, hybridilämmityksen ja älykkään energianohjauksen dynaamisiin sähkö- ja reservimarkkinoihin. Työn tavoitteena on selvittää, miten tämä kokonaisuus tukee kiinteistönhaltijan kustannustehokkuutta sekä resilienssiä energiamurroksen aiheuttamassa sähköjärjestelmän muuttuvassa toimintaympäristössä.

Tutkimus toteutettiin integratiivisena kirjallisuuskatsauksena, asiantuntijahaastatteluina sekä empiirisenä case-tutkimuksena erääseen Senaatti-kiinteistöjen kohteeseen. Analyysissa hyödynnettiin toteutunutta markkina- ja kulutusdataa vuosilta 2021–2025, mikä mahdollisti myös energiakriisin aikaisen hintavaihtelun huomioimisen. Taloudellista kannattavuutta arvioitiin ensisijaisesti nettonykyarvomenetelmällä, jota täydennettiin skenaario- ja herkkyysanalyyseillä tulevaisuuden markkinakehityksen ennakoimiseksi.

Tulokset osoittavat virtuaalivoimalan komponenttien täydentävän toisiaan. Hybridilämmitys tarjoaa investoinnille vakaan taloudellisen perustan, kun taas sähköakuston kannattavuus edellyttää aktiivista ja onnistunutta reservimarkkinaosallistumista. Taloudellisten hyötyjen lisäksi virtuaalivoimala vahvistaa merkittävästi kiinteistön resilienssiä hajauttamalla energianlähteitä ja tukemalla olemassa olevia varavoimajärjestelmiä. Julkiselle toimijalle investoinnin kokonaisarvo muodostuukin markkinaehtoisen tuoton ja strategisen huoltovarmuuden yhdistelmästä.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

School of Engineering Science

Industrial Engineering and Management

Aleksis Kulta

The Economic Impacts and Strategic Significance of a Virtual Power Plant in Public Real Estate

Master's thesis

2026

107 pages, 36 figures, 14 tables and 2 appendices

Examiners: Professor Timo Kärri and postdoctoral researcher Antti Ylä-Kujala

Keywords: virtual power plant, energy transition, resilience, electricity markets, reserve markets, battery energy storage system, hybrid heating, demand response

This master's thesis examines the economic and strategic impacts of a virtual power plant within a public real estate portfolio. The virtual power plant integrates a battery energy storage system, hybrid heating and intelligent energy management with dynamic electricity and reserve markets. The objective of the research is to determine how this system supports the property owner's cost-efficiency and resilience within the changing operating environment of the energy system driven by the energy transition.

The research was conducted as an integrative literature review, expert interviews and an empirical case study of a Senate Properties' site. The analysis utilized historical market and consumption data from 2021–2025, which allowed for the inclusion of the exceptional price volatility during the energy crisis. Economic profitability was evaluated using primarily the net present value method, complemented by scenario and sensitivity analyses to anticipate future market developments.

The results indicate that the components of the virtual power plant complement each other. Hybrid heating provides a stable economic foundation for the investment, while the profitability of the battery energy storage system requires active and successful participation in reserve markets. In addition to economic benefits, the virtual power plant significantly strengthens the property's resilience by diversifying energy sources and supporting existing backup power systems. For a public operator, the total value of the investment is formed through the combination of market-based returns and strategic security of supply.

KIITOKSET/ ACKNOWLEDGEMENTS

Nyt kun viimeinenkin piste on saatu paikalleen ja istumalihakset ovat lopullisesti puutuneet, on aika osoittaa kiitokset niille tahoille, joiden ansiosta tämä projekti on nähnyt päivänvalon.

Ensisijaiset kiitokset kuuluvat luonnollisesti Senaatti-kiinteistöille tämän mahdollisuuden tarjoamisesta. Kiitos luottamuksesta ja tuesta, jota olen saanut organisaatiolta työn eri vaiheissa. Erityiskiitos myös sille, että minulle annettiin riittävästi aikaa syventyä aiheeseen. Tämän ansiosta analyysit saatiin hiottua tasolle, johon myös itse kirjoittaja on tyytyväinen.

Samalla täytyy osoittaa kiitokseni LUT-yliopistolle sekä koko suomen koulutusjärjestelmälle. Opiskelumotivaationi on lähes poikkeuksetta noudattanut periaatetta "mistä aita on matalin", mutta siitä huolimatta lopputuloksena on korkeakoulututkinto, vieläpä ajallaan ja kohtalaisin arvosanoin. Tämä todistanee enemmän järjestelmän sitkeydestä ja omasta kyvystäni keskittyä olennaiseen kuin varsinaisesta kurinalaisuudesta. On suorastaan pieni ihme, että tällä lukemisinnolla on päädytty kirjoittamaan näinkin monta sivua opinnäytetyötä. Tämä projekti on opettanut, että joskus paras motivaatio löytyy yksinkertaisesti siitä, että ongelma on oikeasti ratkaisemisen arvoinen.

Tämän urakan jälkeen on aika siirtyä tarkastelemaan, kuinka korkeita aitoja työelämällä on tarjottavanaan. Luotan siihen, että kyky tunnistaa ne olennaiset haasteet ja järkevin etenemisreitti kantaa jatkossakin, olipa esteen korkeus mikä tahansa.

Espoossa, 25.3.2026

Aleksis Kulta

LYHENNELUETTELO

aFRR	automaattinen taajuuden palautusreservi (automatic frequency restoration reserve)
COP	suorituskykykerroin (coefficient of performance)
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	manuaalinen taajuuden palautusreservi (manual frequency restoration reserve)

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Kiitokset

Lyhenneluettelo

Ilmoitukset

1 Johdanto 11
1.1 Työn tausta 11
1.2 Työn tavoite ja tutkimuskysymykset 13
1.3 Tutkimusmenetelmät 14
1.4 Tutkimuksen rakenne 15
2 Markkinaympäristö ja energiamurros 17
2.1 Energiamurros ja sen vaikutukset 17
2.2 Sähkömarkkinat ja hintavaihtelu 21
2.3 Reservimarkkinat ja niiden merkitys 27
2.4 Kysyntäjousto ja sen rooli energiajärjestelmässä 36
3 Virtuaalivoimala ja sen toimintaperiaatteet 40
3.1 Kiinteistöakku 40
3.2 Hybridilämmitys 47
3.3 Älykäs energian ohjaus 55
4 Kiinteistön kriisinsietokyky 60
4.1 Kriisinsietokyvyn tarve ja sen nykytila 60
4.2 Virtuaalivoimalan hyödyt toimitusvarmuuteen 61
4.3 Kriisinsietokyvyn arvottaminen rahassa 65
5 Taloudellinen ja ympäristöllinen analyysi 67
5.1 Kannattavuuslaskennan menetelmät 67
5.2 Järjestelmän kannattavuus 69
5.3 Herkkyysanalyysi 74
5.4 Ympäristövaikutukset ja päästövähennykset 77

6 Tulevaisuuden näkymät 81
6.1 Sähkömarkkina-analyysi 81
6.2 Skenaarioanalyysi 87
6.3 Riskienhallinta 91
7 Johtopäätökset 94
7.1 Työn tulokset 94
7.2 Tieteellinen kontribuutio, rajoitteet ja jatkotutkimustarpeet 97
Lähteet 99

Liitteet

Liite 1. Case-kiinteistön esittely

Liite 2. Haastattelukysymykset

Kuvaluettelo

Kuva 1: Työn teoreettinen viitekehys
Kuva 2: Tutkimuksen input-output -kaavio
Kuva 3: Suomen sähköenergian tuotantomuotojen kehitys (Tilastokeskus 2025b)
Kuva 4: Suomen sähköntuotannon päästökertoimen kehitys (Tilastokeskus 2025c)
Kuva 5: Suomen kokonaisenergian tuotantomuotojen kehitys (Tilastokeskus 2025a)
Kuva 6: Pörssisähkön kuukausikeskiarvojen hintakehitys (Porssisahko.net n.d.)
Kuva 7: Sähkön hintavaihtelua vuoden 2025 alkupuoliskolta (Porssisahko.net n.d.)
Kuva 8: 0-hintaisten tuntien lukumäärä vuosittain (Porssisahko.net n.d.)
Kuva 9: Säätösähkön määrien vaihtelu ennen 15 minuutin resoluutioon vaihtamista (Fingrid 2026e)
Kuva 10: Säätösähkön määrien vaihtelu 15 minuutin resoluution vaihtamisen jälkeen (Fingrid 2026a)
Kuva 11: Säätösähkön hintavaihtelua vuoden 2025 alkupuoliskolta (Fingrid 2026d)
Kuva 12: Reservituotteiden toiminta kokonaisuutena (Fingrid 2024j)
Kuva 13: Reservituotteiden tarpeen kasvu (Fingrid 2026b)
Kuva 14: Litiumioniakustoteknologian hintakehitys vuoden 2023 dollareina (Linja-Aho et al. 2024, 13)
Kuva 15: 1 MW kulutuksensiirron säästöt kuukausittain
Kuva 16: Reservituotteiden teoreettiset tuotot 1 MW akustolla (Fingrid 2025c)
Kuva 17: Osuus ajasta, kun sähkö on kaukolämpöä halvempaa
Kuva 18: Osuus ajasta, kun lämpöpumpun käyttäminen on kannattavaa
Kuva 19: Kuukausittainen säästö 400 kW lämpöpumpulla
Kuva 20: Lisäsäästöt sähkökattilan käytöstä
Kuva 21: Hybridivoimalan vuosittaiset säästöt yhteensä
Kuva 22: Hybridilämmityskontin kokonaistuotot FCR-D markkinalla
Kuva 23: Hybridilämmityskontin kokonaistuotot FCR-N markkinalla
Kuva 24: Spot-optimoinnin laskennalliset säästöt
Kuva 25: 100 kW joustolla saatavat tuotot reservituotteittain
Kuva 26: Case-kiinteistön suurimmat kolmen vuorokauden kulutuspiikit vuodelta 2024
Kuva 27: Virtuaalivoimalan vaikutukset case-kiinteistön energianhankintaan
Kuva 28: Virtuaalivoimalan vaikutukset case-kiinteistön energiakustannuksiin
Kuva 29: FCR-N tuotteen tarjousmäärät sekä hintataso

Taulukkoluettelo

Taulukko 1: Haastatellut asiantuntijat
Taulukko 2: Sähkön tuntihintojen sekä tuulivoimaennusteen korrelaatio vuosittain (Fingrid 2026f; Porssisahko.net n.d.)
Taulukko 3: Reservituotteiden aktivointi ja säätösuunta (Fingrid 2024i)
Taulukko 4: Reservituotteiden keskihinnat vuodelta 2024 (Fingrid 2026c)
Taulukko 5: IEA:n uusiutuvan energiantuotannon integraation vaiheet (IEA 2024)
Taulukko 6: Eri akkuteknologioiden keskeiset ominaisuudet (Andújar Márquez 2023, 64‑65)
Taulukko 7: Virtuaalivoimalan kustannukset sekä vuosittaiset tuotot
Taulukko 8: Herkkyysanalyysin parametrit ja arvot
Taulukko 9: Kannattavuuden herkkyysanalyysi
Taulukko 10: Sähkömarkkinoiden muutosvoimat ja niiden vaikutukset
Taulukko 11: Sähköjärjestelmän neljä skenaariota (mukaillen Fingrid 2025a)
Taulukko 12: Skenaarioiden parametrien muutokset
Taulukko 13: Investoinnin nettonykyarvot eri skenaarioissa
Taulukko 14: Työn keskeiset tulokset

ILMOITUKSET

Turnitin

Tämän opinnäytetyön alkuperäisyys on tarkistettu Turnitin – samankaltaisuuden tarkastuspalvelun avulla.

Tekoäly

Tämän opinnäytetyön kirjoittaja Aleksis Kulta on käyttänyt seuraavia tekoälytyökaluja opinnäytetyön tekemisessä:

1. ChatGPT
    a. Työkalun käytön tarkoitus: Tekstin kielellinen muokkaus ja selkeyttäminen, vaihtoehtoisten esitystapojen tuottaminen, laskennallisten tarkastelujen jäsentäminen sekä tutkimusasetelman ja analyysien kriittiseen arviointi.
    b. Selvitys työkalun käytöstä: Työkalua on käytetty kirjoittajan tuottamien tekstiluonnosten kielenhuoltoon, tiivistämiseen ja akateemisen ilmaisun kehittämiseen. Työkalu on lisäksi auttanut jäsentämään johtopäätöksiä, tutkimusmenetelmien kuvauksia sekä analyysien sanallista tulkintaa.
2. Google Gemini
    a. Työkalun käytön tarkoitus: Tekstin kielellinen viimeistely, rakenteellinen editointi sekä argumentaation selkeyttäminen ja tiivistäminen.
    b. Selvitys työkalun käytöstä: Kirjoittaja on syöttänyt raakatekstiä työkalulle ja pyytänyt apua tekstin sujuvuuden parantamiseen, toiston karsimiseen ja kappalejaon optimointiin. Tekoäly ei ole tuottanut työhön uutta asiasisältöä, vaan se on toiminut tukena olemassa olevan aineiston ja analyysin muotoilussa.

Vastuu

Kirjoittaja, Aleksis Kulta, ottaa täyden vastuun tämän opinnäytetyön sisällöstä ja on tarkistanut ja muokannut mahdollisen tekoälytyökalujen käytön myötä syntyneen sisällön.

1 Johdanto

Tässä diplomityössä tarkastellaan virtuaalivoimalan roolia kiinteistöjen energiatehokkuuden, markkinaintegraation ja resilienssin parantamisessa muuttuvassa toimintaympäristössä. Johdantoluvussa esitellään tutkimuksen taustalla vaikuttava energiamurros sekä ne keskeiset ajurit, jotka tekevät aiheesta ajankohtaisen kiinteistönhallinnan näkökulmasta. Lisäksi luvussa määritellään työn tavoitteet, rajaukset ja tutkimuskysymykset sekä kuvataan työn rakenne ja siinä käytetyt menetelmät.

1.1 Työn tausta

Globaali energiasektori elää historiallista murrosta, jota ajavat ilmastokriisi, kiristyvät hiilineutraaliustavoitteet ja energian hinnan voimakas vaihtelu. Tämä energiamurros perustuu ennen kaikkea laaja-alaiseen sähköistymiseen, joka muuttaa energian tuotannon, jakelun ja kulutuksen rakenteita. Sähköistyminen on ensisijainen keino korvata fossiiliset polttoaineet liikenteessä, lämmityksessä ja teollisuudessa, mutta se samalla haastaa sähköjärjestelmän vakauden. Tämän seurauksena tarve joustavuudelle, energian varastoinnille ja älykkäälle ohjaukselle kasvaa merkittävästi.

Samalla perinteinen jako sähkönkuluttajan ja -tuottajan välillä hämärtyy tuotannon hajautuessa, ja markkinoiden dynaamisuus tarjoaa uusia mahdollisuuksia aktiivisille toimijoille. Tässä työssä tarkasteltava virtuaalivoimala on järjestelmä, joka yhdistää energiavaraston, hybridilämmityksen ja älykkään ohjauksen yhdeksi kokonaisuudeksi. Se tarjoaa kiinteistöille työkalut hyötyä markkinoiden dynaamisuudesta ja samalla varautua tulevaisuudenmuutoksiin. Tavoitteena on paitsi energiakustannusten minimointi, myös kiinteistön kriisinsietokyvyn parantaminen. Aihe on noussut erittäin ajankohtaiseksi Euroopan nykyisessä geopoliittisessa ympäristössä, jossa sähkön hintoihin on tullut voimakasta vaihtelua, ja toimitusvarmuuden merkitys on korostunut niin kansallisella kuin yksittäisen kiinteistön tasolla.

Senaatti-kiinteistöt hallinnoi valtion laajaa ja monimuotoista kiinteistökantaa, jonka tehtävänä on tarjota asiakkaiden toiminnalle tilat kaikissa olosuhteissa. Nykyisessä ympäristössä

energiatehokkuus, kustannusten hallinta sekä toimitusvarmuus ovat nousseet strategisesti tärkeiksi tavoitteiksi. Energiamurros, lisääntynyt sähkömarkkinoiden volatiliteetti ja markkinamuutokset ovat kuitenkin tehneet kiinteistöjen energianhallinnasta ja pitkäaikaisten kustannusten ennustamisesta entistä haastavampaa.

Perinteisesti valtion kiinteistöjen sähkönhankintaa on suojattu johdannaisilla. Vuoden 2026 aikana sähkön tasevastuu on siirtymässä Senaatti-kiinteistöille, mikä kasvattaa tarvetta ennakoida ja tasapainottaa kulutusta reaaliaikaisesti. Tämän seurauksena on noussut kysymys, voidaanko sähkön hankintaan ja tasehallintaan liittyvää riskiä pienentää investoimalla taloteknisiin ratkaisuihin ja toimimalla aktiivisena osapuolena sähkömarkkinoilla. Samalla nämä investoinnit voivat merkittävästi vahvistaa kiinteistöjen resilienssiä.

Hybridilämmitysjärjestelmiä sekä kiinteistöakkujen kannattavuutta kiinteistöissä on aikaisemmin tutkittu ja hybridilämmitysjärjestelmät ovat osoittautuneet kannattaviksi investoinneiksi (Multisilta 2023). Sähkövarastot ovat Multisillan tutkimuksen mukaan investointina kannattamattomia, mutta laskentaan ei ole huomioitu taajuustuennasta saatavia reservituloja, mikä jättää merkittävän tutkimusaukon. Myös sähkövaraston hyödyntäminen varavoimana on aiemmissa tutkimuksissa rajallista. Lindholmin (2022) tutkimuksessa on todettu, että akusto ei sovellu saarekekäyttöön varavoimana. Tutkimus ei kuitenkaan ota huomioon kiinteistöjen kriisinsietokyvyn parantamista kokonaisvaltaisesti paremman energiahallinnan avulla.

Tämä diplomityö pyrkii täyttämään näitä tutkimusaukkoja tarkastelemalla virtuaalivoimalan taloudellista kannattavuutta ja sen vaikutusta kiinteistön kriisinsietokykyyn kokonaisvaltaisesti. Työssä lähtökohtana on, että resilienssin parantamiseen tehtävät investoinnit mahdollistavat kiinteistöjen aktiivisen osallistumisen sähkömarkkinoille esimerkiksi kulutusjoustojen ja reservimarkkinoiden kautta. Näin kriisinsietokyvyn parantamisesta aiheutuvia kustannuksia voidaan kattaa markkinaperusteisilla tuotoilla. Tutkimuksessa tarkastellaan, miten kiinteistöakku, hybridilämmitys sekä älykäs energiaohjaus voidaan yhdistää virtuaalivoimalaksi, joka parantaa toimitusvarmuutta, hallitsee sähkön hinnan vaihteluita ja tuottaa lisäarvoa reservitulojen kautta.

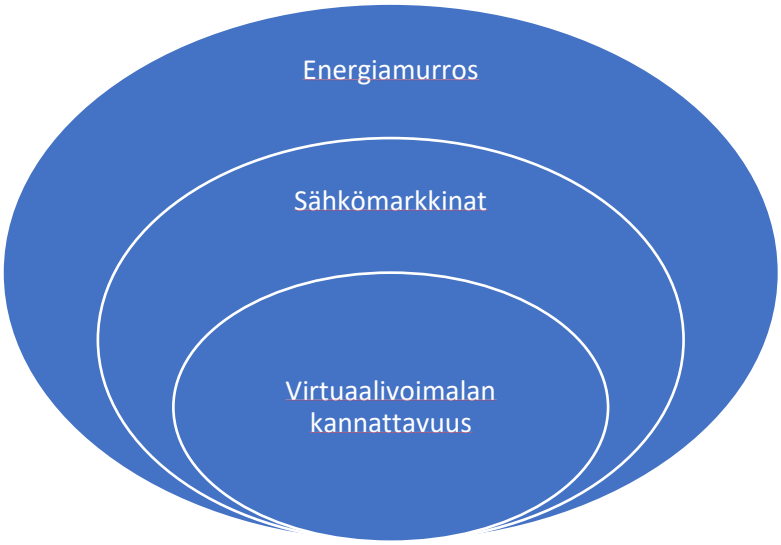
1.2 Työn tavoite ja tutkimuskysymykset

Tämän työn tavoitteena on arvioida virtuaalivoimalan taloudellista kannattavuutta sekä sen tuomia resilienssihyötyjä julkisissa kiinteistöissä. Tutkimuksessa tarkastellaan, miten virtuaalivoimala voi tukea Senaatti-kiinteistöjen strategisia tavoitteita yhdistämällä taloudelliset tuotot sekä toimitusvarmuuden yhdeksi kokonaisuudeksi.

Tutkimuskysymykset ovat seuraavat:

1. Millä edellytyksillä virtuaalivoimalan eri osien toteutus on taloudellisesti kannattavaa kiinteistötasolla?
2. Miten virtuaalivoimala voi lisätä kiinteistöjen resilienssiä ja miten parempi energianhallinta tukee toimitusvarmuutta?
3. Kuinka energiamurros, sähkömarkkinoiden hintavaihtelut ja reservimarkkinat vaikuttavat virtuaalivoimalan liiketoimintamalliin ja kannattavuuteen?

Työ rajautuu käsittelemään Senaatti-kiinteistöjen virtuaalivoimalahankkeen taloudelliseen tarkasteluun. Tekninen järjestelmäsuunnittelu, yksityiskohtaiset talotekniset ratkaisut sekä järjestelmien integraatio rajataan työn ulkopuolelle. Työn teoreettinen viitekehys on esitetty kuvassa 1, ja keskittyy energiamurrokseen, sähkömarkkinoiden toimintalogiikkaan sekä kannattavuuslaskentaan.



Kuva 1: Työn teoreettinen viitekehys

Kuvassa 1 esitetty viitekehys ohjaa myös työn rajauksia. Tutkimus keskittyy ensisijaisesti liiketoiminnalliseen ja strategiseen tarkasteluun, jolloin tekninen järjestelmäsuunnittelu ja yksityiskohtaiset talotekniset ratkaisut rajataan tarkastelun ulkopuolelle. Vaikka virtuaalivoimala vaatii toimiakseen monimutkaista automaatiota, tässä työssä keskitytään näiden järjestelmien tuottamaan arvopotentiaaliin eikä niiden fyysiseen asennusprosessiin tai ohjelmistokohtaiseen integraatioon. Rajauksen tarkoituksena on pitää painopiste sähkömarkkinoissa sekä kannattavuuslaskennassa.

1.3 Tutkimusmenetelmät

Tämän diplomityön tutkimusmenetelmät koostuvat kirjallisuuskatsauksesta, asiantuntijahaastatteluista sekä empiirisestä case-tutkimuksesta. Teoreettinen viitekehys rakennetaan integratiivisen kirjallisuuskatsauksen pohjalta, jonka avulla jäsennetään sähkömarkkinoiden nykytila, virtuaalivoimalan rooli energiajärjestelmässä, keskeiset teknologiset ratkaisut sekä niiden vaikutusmekanismit kiinteistötasolla. Integratiivinen kirjallisuuskatsaus mahdollistaa erilaisten tutkimusten, mallinnusten ja raporttien yhdistämisen yhtenäiseksi kokonaisuudeksi. (Vilkka 2023, 26–27) Menetelmä soveltuu tähän tutkimukseen, koska virtuaalivoimalan hyödyntäminen kiinteistötasolla on moniulotteinen ilmiö ja sitä koskeva tutkimuskenttä on hajautunut.

Tulevaisuuden kehityspolkuja, markkinaodotuksia ja sääntelyyn liittyviä epävarmuuksia täydennetään asiantuntijahaastatteluilla. Haastattelujen tarkoituksena on syventää kirjallisuudessa esitettyjä havaintoja, tunnistaa virtuaalivoimalan käyttöönottoon liittyviä keskeisiä epävarmuustekijöitä sekä arvioida markkinaosallistumisen realistisia edellytyksiä julkisessa kiinteistökannassa. Näin voidaan luoda kattava pohja kannattavuuslaskennan, herkkyysanalyysin sekä skenaarioanalyysin tulosten arvioinnille.

Empiirinen osuus toteutetaan tapaustutkimuksena, jossa hyödynnetään erään Senaatti-kiinteistöjen kohteen energia- ja kulutustietoja. Eisenhardtin (1989) mukaan tapaustutkimus on perusteltu menetelmä, kun tutkittava ilmiö on dynaaminen ja kytkeytyy vahvasti reaalimaailman kontekstiin. Case-kohteen tarkka markkina- ja kulutusdata vuosilta 2021–2025 mahdollistaa realistisen kannattavuuslaskennan, joka huomioi myös energiakriisin aikaisen poikkeuksellisen hintatason. Resilienssiä arvioidaan laadullisesti tarkastelemalla omavaraisuuden muutoksia eri virtuaalivoimalajärjestelmillä. Pelkän historiadatan avulla tehtäviin

ennusteisiin sisältyy epävarmuuksia, joten havaintoja verrataan kirjallisuudessa esitettyihin markkinakehityksen suuntauksiin sekä asiantuntijoiden näkemyksiin.

Haastattelujen tavoitteena on syventää kirjallisuudessa esitettyjä havaintoja, tunnistaa virtuaalivoimalan käyttöönottoon liittyviä keskeisiä epävarmuustekijöitä sekä arvioida markkinaosallistumisen realistisia edellytyksiä kiinteistötasolla. Haastateltavat on esitelty tarkemmin taulukossa 1 ja haastattelukysymykset liitteessä 2. Vastausten sekä muun kirjallisuuden pohjalta muodostetaan skenaarioanalyysi, jossa virtuaalivoimalan vaikutuksia arvioidaan eri skenaarioissa.

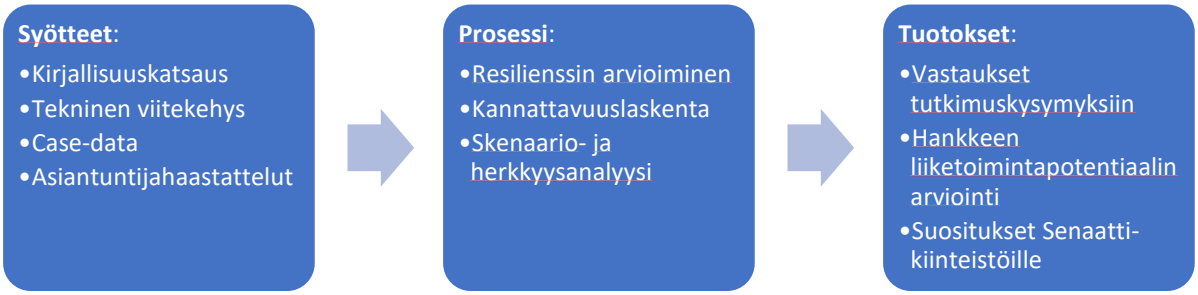
Taulukko 1: Haastatellut asiantuntijat

Organisaatio	**Nimike**	**Nimi**
Fingrid	Vanhempi asiantuntija, reservimarkkinat	Tuomas Mattila
Energiavirasto	Yksikönpäällikkö, tukkumarkkinat	Jarno Lamponen
LUT Yliopisto	Energiamarkkinoiden ja energiajärjestelmien professori	Samuli Honkapuro

Valitut tutkimusmenetelmät yhdessä mahdollistavat virtuaalivoimalan tarkastelun taloudellisena, toiminnallisena ja strategisena kokonaisuutena. Case-tutkimuksen luonteeseen kuuluu rajallinen yleistettävyys, mikä tunnistetaan tässä työssä. Tulokset eivät ole sellaisenaan siirrettävissä kaikkiin kiinteistöihin, mutta virtuaalivoimalan keskeiset vaikutusmekanismit ovat kiinteistötyypistä riippumatta samankaltaisia. Kiinteistökohtaisesti vaihtelevat ensisijaisesti laitteiden mitoitus, kulutusprofiili ja käytettävissä oleva joustopotentiaali, mikä mahdollistaa tulosten soveltamisen muihin kohteisiin harkinnanvaraisesti.

1.4 Tutkimuksen rakenne

Tämä tutkimus koostuu seitsemästä pääluvusta, jotka muodostavat jatkumon teoreettisesta viitekehyksestä kohti käytännön skenaarioanalyysia ja johtopäätöksiä. Tutkimuksen eteneminen ja tiedon muodostumisen prosessi on havainnollistettu kuvassa 2 esitetyn input-output -kaavion avulla.



Kuva 2: Tutkimuksen input-output -kaavio

Johdannossa on esitelty tutkimuksen tausta, tavoitteet, tutkimuskysymykset sekä rajaukset. Toisessa luvussa tarkastellaan työn teoreettista sekä markkinallista viitekehystä käsittelemällä energiamurrosta sekä sen vaikutuksia nykyisiin sähkömarkkinoihin, reservimarkkinoihin sekä kysyntäjouston rooliin. Luku luo perustan virtuaalivoimalan taloudelliselle ja toiminnalliselle tarkastelulle.

Kolmannessa luvussa käsitellään virtuaalivoimalan tekniset osatekijät eli kiinteistöakku, hybridilämmitysjärjestelmä sekä älykäs energiaohjausjärjestelmä. Luvun tarkoituksena on esitellä lukijalle teknologioiden tekniset perusperiaatteet sekä mihin osien ansaintalogiikka perustuu. Neljäs luku keskittyy kiinteistön kriisinsietokykyyn ja arvioi, millä tavoin virtuaalivoimala voi parantaa toimitusvarmuutta, energiaomavaraisuutta ja joustavuutta sekä miten näitä resilienssihyötyjä voidaan huomioida osana taloudellista arviointia.

Viides luku sisältää taloudellisen sekä ympäristövaikutusten analyysin, jossa tarkastellaan virtuaalivoimalan kannattavuutta case-kiinteistön avulla, herkkyyttä eri muuttujille sekä voimalan laadullisia vaikutuksia muun muassa ympäristölle. Kuudennessa luvussa herkkyysanalyysiä jatketaan sähkömarkkina-analyysillä sekä skenaarioanalyysillä. Luvun lopussa käsitellään myös virtuaalivoimalan toteutuksen riskit markkinoiden näkökulmasta. Seitsemännessä luvussa esitetään työn johtopäätökset, vastataan tutkimuskysymyksiin sekä tiivistetään keskeiset havainnot.

2 Markkinaympäristö ja energiamurros

Tässä luvussa tarkastellaan energiamurroksen aiheuttamia muutoksia Suomen sähkömarkkinoilla ja niiden vaikutuksia kiinteistöjen energianhallintaan. Luvussa käsitellään sähkömarkkinoiden eri osa-alueita, kuten spot- ja futuurimarkkinoita, reservimarkkinoita sekä kysyntäjoustoa. Luvussa tarkastellaan eri tuotteiden hintakehityksiä, volatiliteettia ja merkitystä energiamarkkinoille. Lisäksi luvussa pohditaan, miten energiamurros muokkaa markkinoiden rakennetta ja luo sekä haasteita että mahdollisuuksia kiinteistöille energiatehokkuuden, kustannusten hallinnan ja toimitusvarmuuden näkökulmista.

2.1 Energiamurros ja sen vaikutukset

Energiamurros tarkoittaa siirtymää kohti vähähiilistä ja kestävämpää energiantuotantoa, jossa fossiiliset polttoaineet korvataan uusiutuvilla energialähteillä, kuten tuuli-, aurinko- ja vesivoimalla. Historiallisesti energiamurrokset ovat tarkoittaneet merkittäviä muutoksia energian lähteissä ja teknologioissa, kuten siirtymistä puusta kivihiileen ja edelleen öljyyn. Nykyinen energianmurros keskittyy erityisesti hiilineutraaleihin ratkaisuihin, jonka ajurina on erityisesti tavoite saavuttaa hiilineutraalius sekä rajoittaa maapallon lämpenemistä. (Yang et al. 2024)

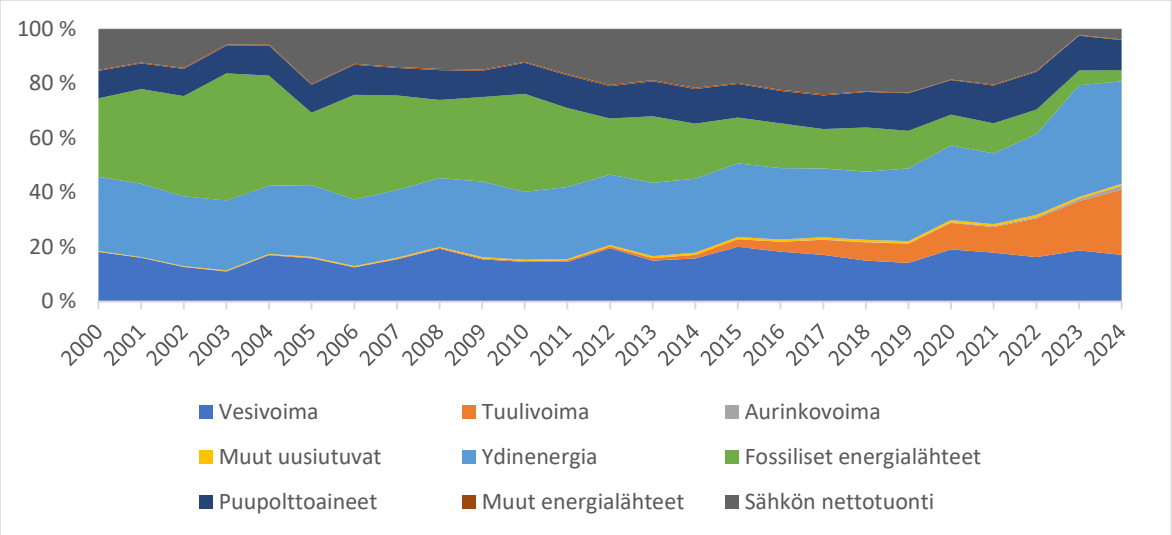
Energiamurros perustuu kolmeen keskeiseen periaatteeseen: energiatehokkuuteen, energialähteiden korvaamiseen ja kulutuksen hillintään. (Yang et al. 2024) Tehokkuus tarkoittaa energian järkevää muuntamista ja energiahukan vähentämistä koko energiaketjussa. Korvaaminen sisältää fossiilisten energialähteiden vähittäisen korvaamisen uusiutuvilla energialähteillä. Hillintä taas edellyttää nykyisten kulutustottumusten tarkastelua ja energiankäytön vähentämistä kestävällä tavalla. (Lachal 2019, 25–28)

Energiamurroksen onnistumisen kannalta kaikki kolme periaatetta ovat tärkeitä. Fossiiliset hiilivedyt ovat erittäin energiatiheitä, ja esimerkiksi bensiini on jopa 50 kertaa litiumionipohjaista akkua energiatiheämpää (Naqvi et al. 2022). Energiatiheys on yksi päätekijöistä, miksi suora korvaaminen on haastavaa ilman samanaikaista parannusta energiatehokkuudessa. Esimerkiksi sähköautojen akkuihin ei saada pakattua yhtä paljon energiaa kuin perinteiseen

bensatankkiin, mutta energiatehokkaan sähkömoottorin sekä jarrutusenergian talteenoton ansiosta täydellä akulla voidaan saavuttaa lähes vastaavat toimintamatkat kuin bensiiniautolla.

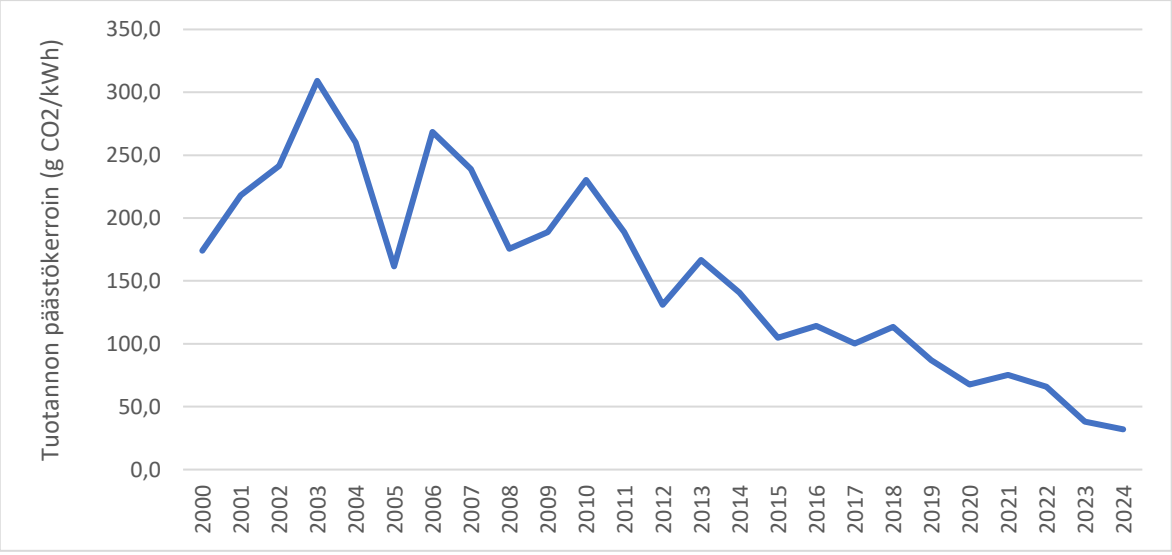
Energiamurrosta ajatellaan kirjallisuudessa laaja-alaisena ilmiönä, joka kattaa teknologisten muutosten lisäksi myös taloudelliset, sosiaaliset ja poliittiset muutokset. Se sisältää muutoksia kaikessa energian tuotannossa, varastoinnissa, siirrossa sekä sääntelyssä. Murros ei siis rajoitu pelkästään uusiutuviin energiamuotoihin, vaan siihen liittyy myös laajempia yhteiskunnallisia ja hallinnollisia ulottuvuuksia. (Yang et al. 2024) Tässä diplomityössä keskitytään energiamurroksen vaikutuksiin erityisesti sähkön tuotannon ja sähköverkon kannalta, mutta myös poliittiset muutokset tulee huomioida, sillä ne voivat vaikuttaa sähkömarkkinoiden toimintaan tulevaisuudessa.

Sähköistyminen on yksi energiamurroksen kulmakivistä, sillä sähköllä voidaan uusiutuvien energiamuotojen avulla korvata fossiilisia päästölähteitä useilla sektoreilla. Suomi on tässä kehityksessä moniin muihin maihin verrattuna edelläkävijä. Suomen sähköntuotanto perustuu nykyisin lähes täysin fossiilittomiin tai uusiutuviin energialähteisiin, mikä näkyy selvästi sähköntuotannon rakenteessa, joka on esitetty kuvassa 3. Fossiilisia energianlähteitä on tasaisesti korvattu tuulivoimalla vuodesta 2015 alkaen, ja vuonna 2024 tuulivoiman osuus Suomen energiatuotannosta oli jo 24 %. Myös ydinvoiman nousu Olkiluoto 3:n käyttöönoton yhteydessä vuosina 2022–2023 on nähtävissä kuvaajalta (Tilastokeskus 2025b). Aurinkovoima, muut uusiutuvat sekä muut energianlähteet ovat Suomen sähköntuotannossa marginaalissa, mutta aurinkovoiman määrä on hienoisessa nousussa. Huomionarvoista on, että vuodesta 2019 alkaen tuulivoimaa on rakennettu täysin markkinaehtoisesti, eli ilman erillisiä tukia. (Suomen uusiutuvat ry 2024)



Kuva 3: Suomen sähköenergian tuotantomuotojen kehitys (Tilastokeskus 2025b)

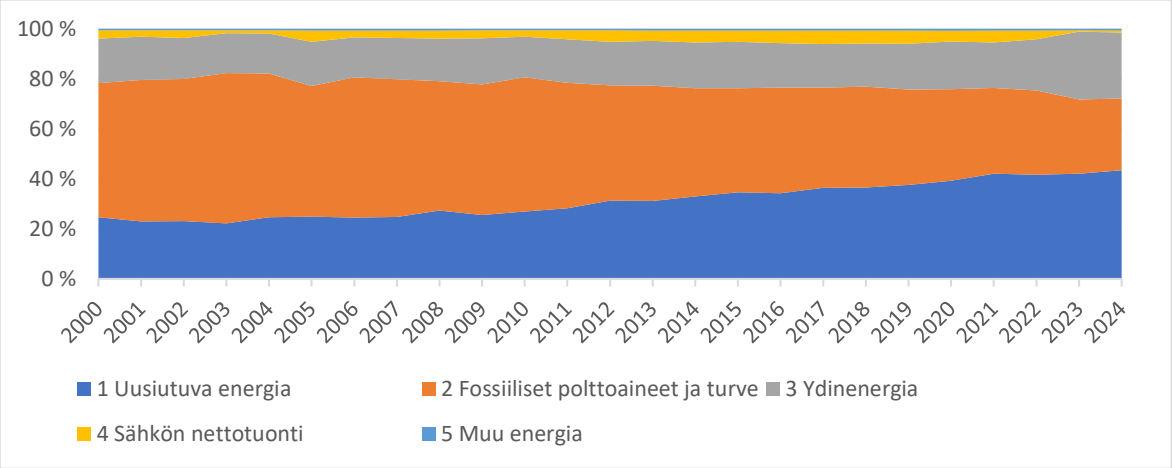
Tuotantomuotojen muutoksen vaikutukset näkyvät selvästi myös sähkön tuotannon hiilidioksidipäästöissä. Kuvassa 4 on kuvattu sähkön päästöintensiteetin kehitystä. Viime vuosikymmenet sähköenergian tuotannon päästökerroin on laskenut tasaisesti, ja vuonna 2024 keskimääräinen sähkön päästökerroin oli vain 32 g CO2/kWh. 2000-luvun alussa päästökerroin on ollut jopa yli 300 g CO2/kWh. (Tilastokeskus 2025c) Tämä kehitys luo perustan myös muiden sektorien sähköistymiselle, sillä se mahdollistaa päästöjen vähentämisen samalla, vaikka energian kokonaiskulutus pysyisi samana.



Kuva 4: Suomen sähköntuotannon päästökertoimen kehitys (Tilastokeskus 2025c)

Kokonaisenergian tuotannon tarkastelu osoittaa toisenlaisen kuvan. Kuvassa 5 on esitetty Suomen kokonaisenergian tuotantomuotojen suhteellista kehitystä. Fossiilisilla

energianlähteillä on Suomessa edelleen merkittävä osuus, kun sähköenergian kulutukseen lisätään lämmitys, liikenne sekä teollisuus. Kun nämä sektorit tuodaan osaksi kokonaisuutta, fossiilisten energialähteiden osuus nousee merkittävästi, ja vuonna 2024 fossiilisten energialähteiden osuus oli edelleen jopa 29 % energiantuotannosta. Kehitys on ollut 2000-luvulla tasaista, mutta sähköön verrattuna energiantuotanto vielä hyvin hiilipainotteista. (Tilastokeskus 2025a) Juuri tästä syystä sähköistyminen voidaan nähdä yhtenä tehokkaimmista keinoista vähentää päästöjä koko energiataloudessa.



Kuva 5: Suomen kokonaisenergian tuotantomuotojen kehitys (Tilastokeskus 2025a)

Tutkimusten mukaan, ilmaston lämpenemisen rajoittaminen kahteen celsius-asteeseen vuoteen 2050 mennessä vaatii jopa 66 % energian sähköistymisasteen (Luderer et al. 2022). Tästä syystä sähköistymistä onkin kirjallisuudessa kutsuttu ”uudeksi öljyksi” (Aalto et al. 2021, 3). Suuren sähköistymisasteen saavuttamiseksi tarvitaan sekä suoraa että epäsuoraa sähköistymistä. Suoraksi sähköistymiseksi kutsutaan fossiilisten polttoaineiden korvaamista sähköllä. Epäsuora sähköistyminen tarkoittaa sähköenergian hyödyntämistä välillisesti energian kantajien, kuten vedyn tai synteettisten polttoaineiden, tuotantoon. Epäsuoralla sähköistymisellä voidaan sähköistää myös niitä sektoreita, joita ei voida suoraan sähköistää, kuten pitkän matkan liikenne sekä raskas teollisuus. (Aalto et al. 2021, 7)

Energiamurros ja suuren mittakaavan sähköistyminen luovat haasteita sähköjärjestelmälle, jonka tuotannon ja kulutuksen on pysyttävä tasapainossa reaaliaikaisesti. Pienetkin poikkeamat taajuudessa, voivat johtaa häiriöihin sähkön toimituksessa. Jos kulutus on suurempaa kuin tuotanto, taajuus laskee, kun taas tuotannon ylittäessä kulutuksen, taajuus nousee. Suomen sähköverkko käy 50 hertsin taajuudella ja sitä ylläpitää Fingrid. Suomen sähköverkon taajuuden sallittu vaihteluväli on 49,9 ja 50,1 Hz. (Fingrid 2017b) Sähköverkon tasapaino

on siis koko sähköjärjestelmän perusta, ja sen hallinta on pakollista sähköverkon toimivuuden takaamiseksi.

Perinteisesti taajuuden hallinta on ollut helppoa, sillä sähköä on tuotettu suurissa keskitetyissä voimaloissa, joiden tehoa on voitu säätää kysynnän mukaan. Nyt uusiutuvien tuotantotapojen yleistyessä, sähköntuotanto on hajautetumpaa sekä säärippuvaisempaa. Tämä on vähentänyt sähköverkon inertiaa, jolla tarkoitetaan järjestelmän kykyä vastustaa nopeita muutoksia taajuudessa ja säilyttää stabiilius häiriöiden aikana. Inertia on aiemmin syntynyt suurten tahtigeneraattoreiden pyörimisliikkeestä, mutta nyt joustoa täytyy hakea kulutuksesta tai inertiaa täytyy luoda virtuaalisesti. (Kerdphol et al. 2018)

Virtuaalisella inertialla tarkoitetaan keinotekoisesti tuotettua inertiaa, jonka avulla sähköverkon taajuutta voidaan tasata. Tämä saavutetaan esimerkiksi rajoittamalla uusiutuvien energiamuotojen tehoa siten, että osa kapasiteetista jää säädön varaan. Erilaisia ohjausjärjestelmiä on kehitelty erityisesti hyödyntämään tuulimyllyjen pyörimisenergiaa. (Meyn et al. 2018, 284–285) Tällöin osaa potentiaalisesta energiamäärästä jää kuitenkin hyödyntämättä, sillä tuulimyllyt eivät pyöri täydellä teholla. Tehokkaampia virtuaalisen inertian lähteitä ovat erilaiset energiavarastot, kuten akustot, superkondensaattorit ja vauhtipyörät (Meyn et al. 2018, 284). Tutkimusten mukaan sähköakustolla luotu virtuaalinen inertia kykenee merkittävästi vähentämään taajuuspoikkeamia ainakin pienemmissä mikroverkoissa (Kerdphol et al. 2018)

Energiamurroksen edetessä sähköistyminen kasvattaa sähkön kysyntää ja lisää kuormituksen vaihtelua, mikä tekee taajuuden hallinnasta entistä kriittisempää. Koska virtuaalisen inertian luominen uusiutuvien energianlähteiden tuotannolla ei ole järkevää, ratkaisut tulisi löytää kysyntäjouston ja energiavarastojen yhdistelmästä. Näin tulevaisuuden sähköjärjestelmällä voidaan saavuttaa maksimaaliset hyödyt.

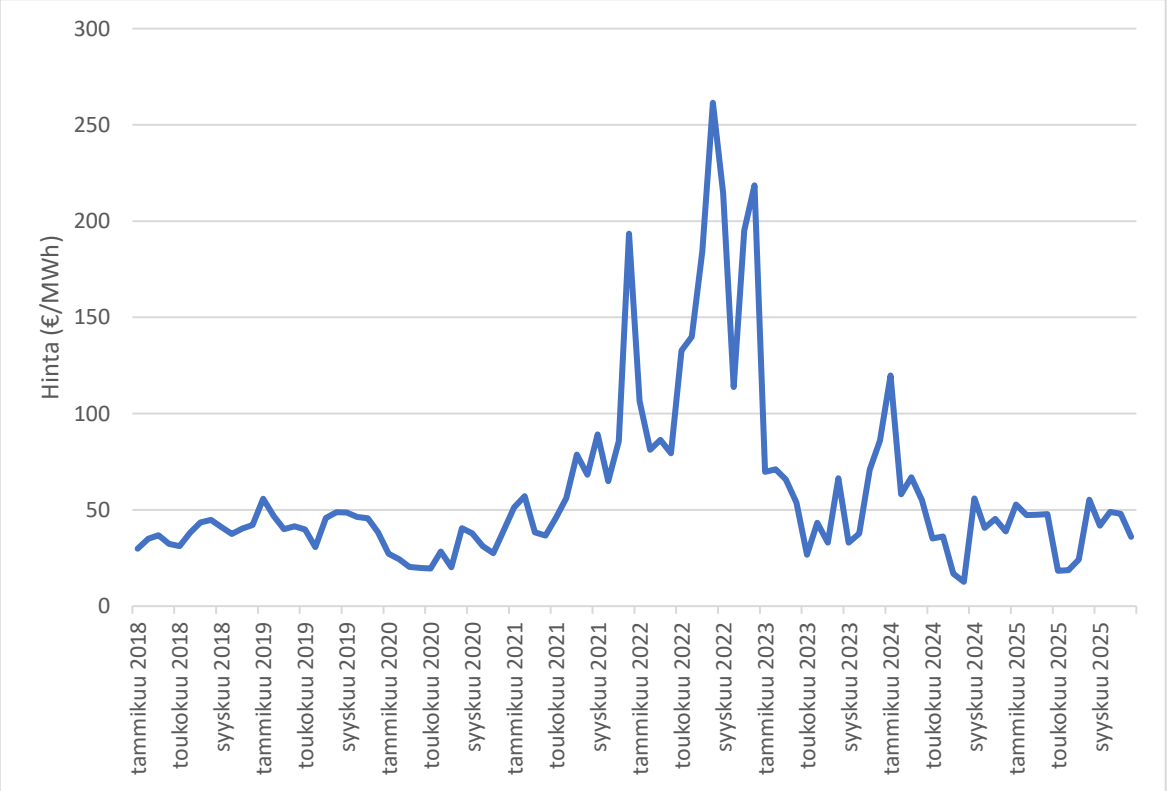
2.2 Sähkömarkkinat ja hintavaihtelu

Sähkön hinta määräytyy pohjoismaisilla sähkömarkkinoilla Nord Pool -pörssissä, jossa hinnanmuodostus perustuu täysin kysynnän ja tarjonnan lakeihin. Nord Pool toimii laajasti koko Pohjois-Euroopassa, ja siihen kuuluu Skandinavian ja Baltian maiden lisäksi myö osa Keski-Euroopan maista. Markkinoiden keskeisin osa on day-ahead-markkina, eli spot-markkina,

jossa sähkön tuottajat ja ostajat jättävät tarjouksensa seuraavalle vuorokaudelle viimeistään klo 13.00 Suomen aikaa. (Nord Pool n.d.) Aikaisemmin tarjoukset on jätetty tunneittain, mutta 1.10.2025 alkaen vuorokausimarkkinat ovat toimineet vartin resoluutiolla (Fingrid 2025d). Markkinapaikka laskee jokaiselta vartilta kysyntä- ja tarjontakäyrien leikkauskohdan, joka määrää kyseisen vartin systeemihinnan.

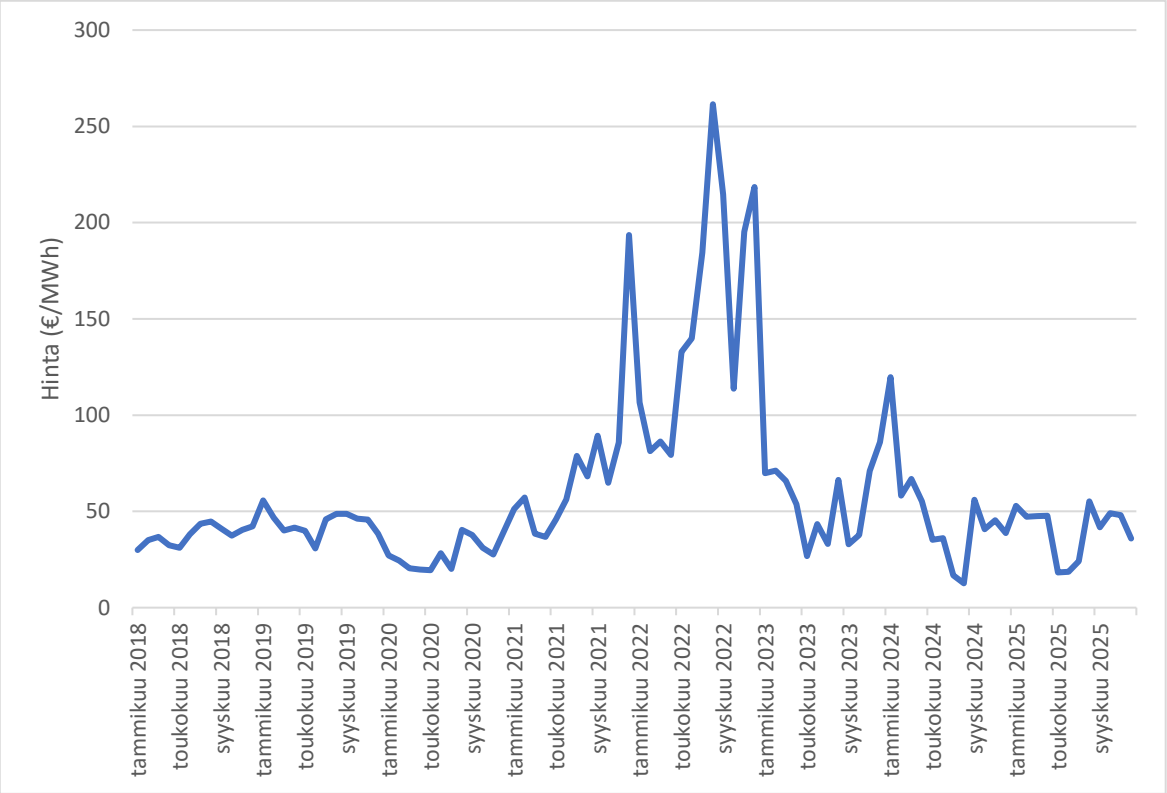
Mikäli siirtorajoitteet jakavat markkinoita, syntyy niiden perusteella myös erillisiä aluehintoja. Käytännössä alueellisia rajoitteita syntyy lähes aina, jolloin jokaiselle hinta-alueelle muodostuu omat hinnat. (Nord Pool n.d.c) Suomi muodostaa yhden yhtenäisen tarjousalueen, joten Suomen sisällä ei synny aluehintaeroja. Suomessa siirtoyhteydet ovat riittävät, joten yhden alueen hintaa on mahdollista ylläpitää. Sen sijaan esimerkiksi Ruotsi ja Norja on jaettu useampaan alueeseen, sillä siirtoyhteydet eivät ole riittävät yhden alueen ylläpitämiseksi.

Suomen aluehinnan kehitystä seuratessa, on selvästi huomattavissa geopoliittiset muutokset.



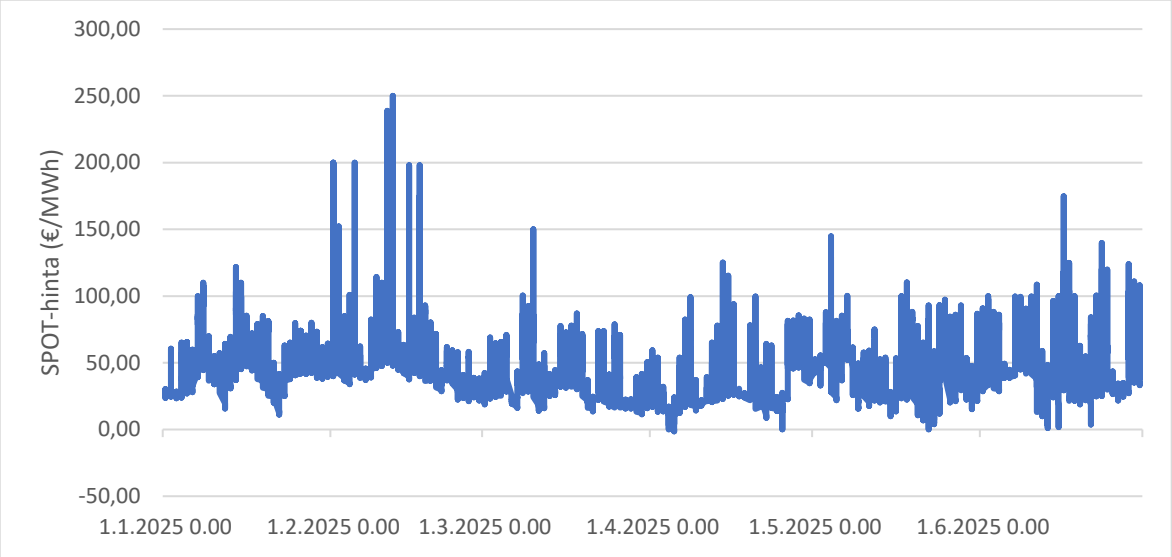
Kuva *6*: Pörssisähkön kuukausikeskiarvojen hintakehitys on esitetty sähkön kuukausittaiset keskihinnat vuosilta 2018–2025. Kuvaajasta on nähtävissä koronapandemian aiheuttama pieni hintatason lasku, jonka jälkeen energiakriisin vaikutukset nostivat merkittävästi sähkön hintatasoa vuosina 2021 ja 2022, mutta vuodesta 2023 eteenpäin hintataso on tasaantunut.

Poikkeuksena on pieni hintanousu vuosien 2023 ja 2024 välisenä talvena, jolloin kylmä sää nosti sähkön kysyntää. Kuvaajasta on nähtävissä, miten sähkön tukkuhinta on vuoden 2025 aikana tippunut takaisin noin 50 €/MWh tasolle. (Porssisahko.net n.d.)



Kuva 6: Pörssisähkön kuukausikeskiarvojen hintakehitys (Porssisahko.net n.d.)

Tasaisista keskihinnoista huolimatta, Suomen Spot-hinnoissa on erittäin paljon hintavaihtelua. Kuvasta 7 on nähtävissä vuoden 2025 alkupuolen hintapiikkejä. Vuoden 2025 alkupuoliskon sähkön keskiarvoinen hinta on ollut 38,62 €/MWh ja keskihajonta on ollut jopa 55,43 €/MWh. Suurimmat hintapiikit ovat olleet yli 200 €/MWh. (Porssisahko.net n.d.)



Kuva 7: Sähkön hintavaihtelua vuoden 2025 alkupuoliskolta (Porssisahko.net n.d.)

Suomessa sähkön hintavaihtelua selittää erityisesti tuulivoiman tuotantoennusteet. Tuulivoiman suuren kapasiteetin takia sähköntuottajat joutuvat tuuliennusteiden perusteella arvioimaan omaa tuotantoaan. Koska tuulivoiman tuotannon marginaalikustannus on lähes nolla, runsas tuulituotanto painaa spot-hintoja alaspäin erityisesti tuulisina tunteina. Taulukossa 2 on esitetty tuulivoiman ennusteen sekä sähkön hinnan väliset korrelaatiot eri vuosilta. Ennusteet on julkaistu edeltävänä vuorokautena klo 12 Suomen aikaa, eli tuntia ennen spot-markkinoiden tarjousajan päättymistä (Fingrid 2026f). Ne kuvaavat siis hyvin eri markkinaosapuolten käsitystä seuraavan vuorokauden tuulivoiman tuotannosta tarjoushetkellä.

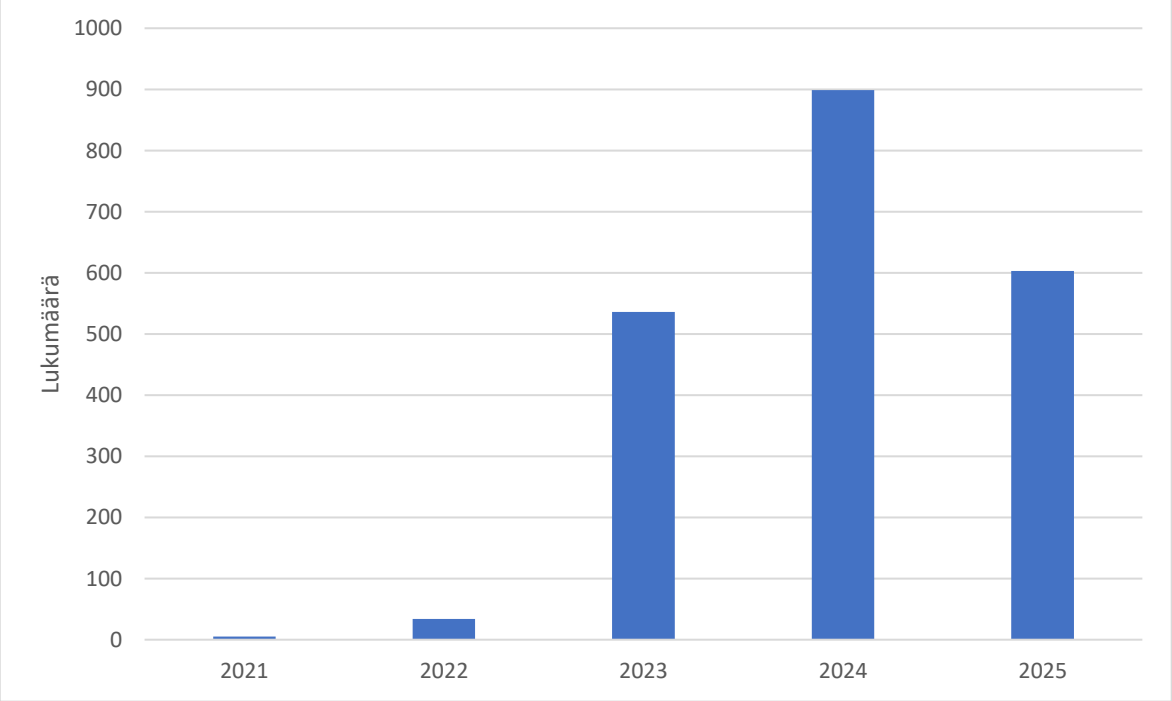
Taulukko 2: Sähkön tuntihintojen sekä tuulivoimaennusteen korrelaatio vuosittain (Fingrid 2026f; Porssisahko.net n.d.)

Vuosi	**Korrelaatio**
2021	-0,112
2022	-0,485
2023	-0,390
2024	-0,314
2025	-0,518

Korrelaatiot osoittavat, että tuulivoiman tuotantoennusteiden ja sähkön hinnan välinen yhteys on selvästi negatiivinen. Vuonna 2021 yhteys oli vielä heikko (-0,11), mutta vuodesta 2022 lähtien korrelaatiot ovat pysyneet selvästi negatiivisina, ja vuoden 2025 arvo -0,52 kertoo jo kohtalaisesta riippuvuudesta ennustetun tuulivoiman ja spot-hinnan välillä. Suomen

sähkömarkkinoihin vaikuttavat samanaikaisesti muun muassa kulutus, naapurimaiden markkinat, vesivoimatilanne sekä ydinvoimaloiden huollot, joten yksittäisen tekijän vaikutuksen erottaminen hinnanvaihtelusta ei ole yksinkertaista. Tästä syystä korrelaatiokerrointa -0,52 voidaan pitää merkittävänä, sillä se osoittaa, että tuulivoimaennuste selittää huomattavan osan hintavaihtelusta, vaikka useat muutkin tekijät vaikuttavat markkinoihin.

Suurien hintapiikkien lisäksi myös 0-hintaiset tunnit ovat yleistyneet Suomessa. Kuvassa 8 on kuvattu vuosittain niiden tuntien lukumäärä, jolloin pörssisähkön hinta on ollut negatiivinen tai tasan 0. Negatiiviset ja 0-hintaiset tunnit syntyvät lähes poikkeuksetta silloin, kun tarjonta ylittää kysynnän, pääsääntöisesti tuulivoiman runsaan tuotannon ja alhaisen kulutuksen yhteydessä. Lisäksi Suomessa uusiutuvan energian tuotannolle myönnetään alkuperätakuita, joiden avulla kuluttaja voi ostaa uusiutuvalla energialla tuotettua sähköä ja maksaa siitä hieman suuremman marginaalin (Energiavirasto n.d.). Tämä tekee esimerkiksi tuulivoimatuotannosta taloudellisesti kannattavaa myös tilanteissa, joissa sähkön markkinahinta on hetkellisesti negatiivinen. Kuvaajasta on nähtävissä, että 0-hintaisten tuntien lukumäärä on laskenut vuoden 2024 jälkeen, jota osaltaan selittää alkuperätakuiden hinnan lasku, mutta myös joustavan kulutuksen lisääntyminen.



Kuva 8: 0-hintaisten tuntien lukumäärä vuosittain (Porssisahko.net n.d.)

Day-ahead-kaupan jälkeen avautuvat intraday-markkinat, eli päivänsisäiset markkinat. Päivänsisäisillä markkinoilla voidaan käydä kauppaa lähes sähkön toimitushetkeen saakka.

Niiden avulla sähköntuottajat ja -toimittajat voivat korjata tai täydentää omia tuotanto- ja kulutusennusteitaan esimerkiksi muuttuneen säätilanteen, kulutushuipun tai laitehäiriön vuoksi. Suomessa intraday-kaupankäynti tapahtuu Nord Poolin markkinapaikalla, ja se tarjoaa mahdollisuuden ostaa tai myydä sähköä vielä spot-markkinoiden sulkeutumisen jälkeen. (Fingrid 2019; Nord Pool n.d.a) Tuuli- ja aurinkovoiman kapasiteetin kasvu tekee intraday-markkinoista yhä tärkeämmän osan sähköjärjestelmän tasapainottamista, sillä sääennusteet tarkentuvat vasta lähellä toimitushetkeä. Tämä tarkoittaa, että tuottajat voivat joutua korjaamaan day-ahead-markkinoilla tekemiään tarjouksia, jos esimerkiksi tuulen voimakkuus tai auringonpaisteen määrä poikkeaa ennusteesta. Intraday-kaupan avulla toimittajat voivat siis varmistaa, että sähkön myyntitarjoukset pysyvät tasapainossa todellisen tuotannon ja kulutuksen välillä.

Suojautuakseen sähkön hintavaihteluilta, yritykset ja muut suuret toimijat voivat hankkia sähkönsä myös johdannaismarkkinoilta. Näillä markkinoilla ei käydä kauppaa itse sähköllä, vaan sähkön hinnan tulevaisuuden kehitykseen perustuvilla sopimuksilla, kuten futuureilla ja optioilla. Näillä markkinoilla tuottajat voivat varmistaa vähimmäishinnan tulevalle tuotannolleen, ja kuluttajat puolestaan voivat suojautua hintapiikkejä vastaan. Pohjoismaissa kauppaa käydään Nasdaq Commodities -pörssissä, jossa sopimusten hinnat määräytyvät markkinoiden odotusten mukaan tulevasta sähkön hinnasta. (Fingrid 2019; Nasdaq n.d.)

Sähkön hinnan suojaaminen johdannaismarkkinoilla on tyypillisesti kannattavaa tilanteissa, joissa sähkön hinta on nousutrendissä esimerkiksi polttoaineiden kallistumisen tai heikon vesitilanteen vuoksi. Tällöin futuurien avulla voidaan lukita sähkölle tulevaisuutta varten alempi hinta kuin mitä spot-markkinoilla myöhemmin toteutuisi. Vastaavasti laskevien markkinoiden aikana futuurien hinnat jäävät usein toteutunutta spot-hintaa korkeammiksi, jolloin suojaus ei ole taloudellisesti kannattavaa. Johdannaismarkkinoiden toiminta siis muistuttaa kuluttajille tarjottavia kiinteitä sähkösopimuksia. Molemmissa tapauksissa maksetaan ennustettavuudesta ja riskin siirtämisestä pois omalta vastuulta.

Johdannaismarkkinat voidaan siten rinnastaa vakuutuksen ostamiseen. Yritys tai muu toimija maksaa siitä, että sähkön hinta pysyy ennustettavissa ja budjetoitavissa. Odotusarvoisesti suojaus johtaa suurempiin kustannuksiin pitkällä aikavälillä, sillä riskin siirtämisestä maksetaan aina hinta. Lähtökohtaisesti on taloudellisesti järkevää vakuuttaa vain ne riskit, jotka toteutuessaan aiheuttaisivat merkittävän tai jopa kohtalokkaan haitan organisaation

talouteen. Tästä syystä erityisesti suurten sähköriippuvaisten käyttäjien, kuten teollisuuslaitosten, on järkevää suojata myös sähkön hankintansa.

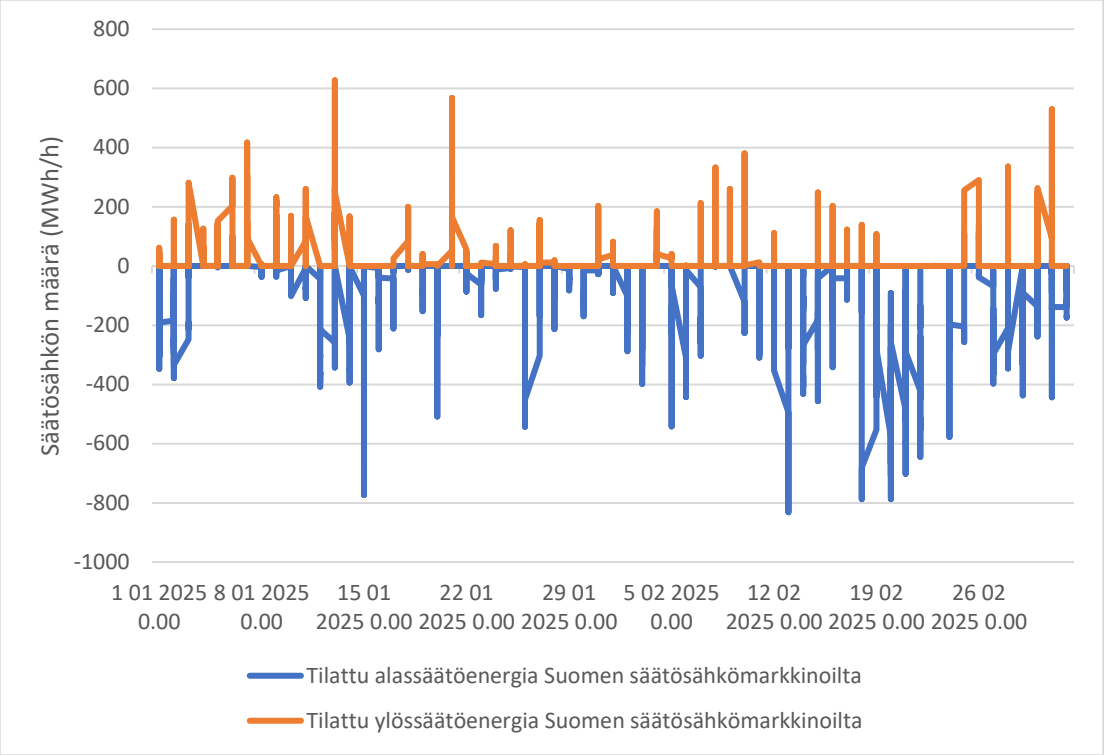
2.3 Reservimarkkinat ja niiden merkitys

Intraday-markkinoiden tarjoamasta tasapainotusmahdollisuudesta huolimatta, sähköntuottajien tuotanto- sekä kulutusennusteet voivat mennä pieleen. Tätä virhettä kutsutaan tasepoikkeamaksi, joka on sähköverkon toiminnan kannalta haitallista. Sähköverkon tuotannon ja kulutuksen tulee olla tasapainossa joka hetki sen toimivuuden takaamiseksi, joten tasepoikkeamat täytyy korjata säätösähkömarkkinoilla sekä reservimarkkinoilla. Ne tarjoavat kantaverkkoyhtiöille valmiuden korjata järjestelmän tasapainoa nopeasti, mikäli tuotanto ja kulutus poikkeavat ennusteista.

Taseselvityksessä sähkömarkkinoilla toimivien tasevastaavien toteutuneet ja tarjotut tuotanto- sekä kulutusmäärät verrataan toisiinsa. Mikäli toteutumat poikkeavat tarjouksista, syntyy tasepoikkeamaa. Selvityksessä lasketaan jokaiselle selvitysjaksolle kokonaispoikkeama ja sen aiheuttamat kustannukset kohdennetaan poikkeamien aiheuttajille. Tasevastaavat voivat joko maksaa tai saada rahaa, riippuen poikkeaman suuruudesta, suunnasta ja silloisesta tasesähkön hinnasta. Tämä mekanismi kannustaa markkinatoimijoita pysymään mahdollisimman tarkasti tasapainossa ennusteidensa ja toteutuman kanssa.

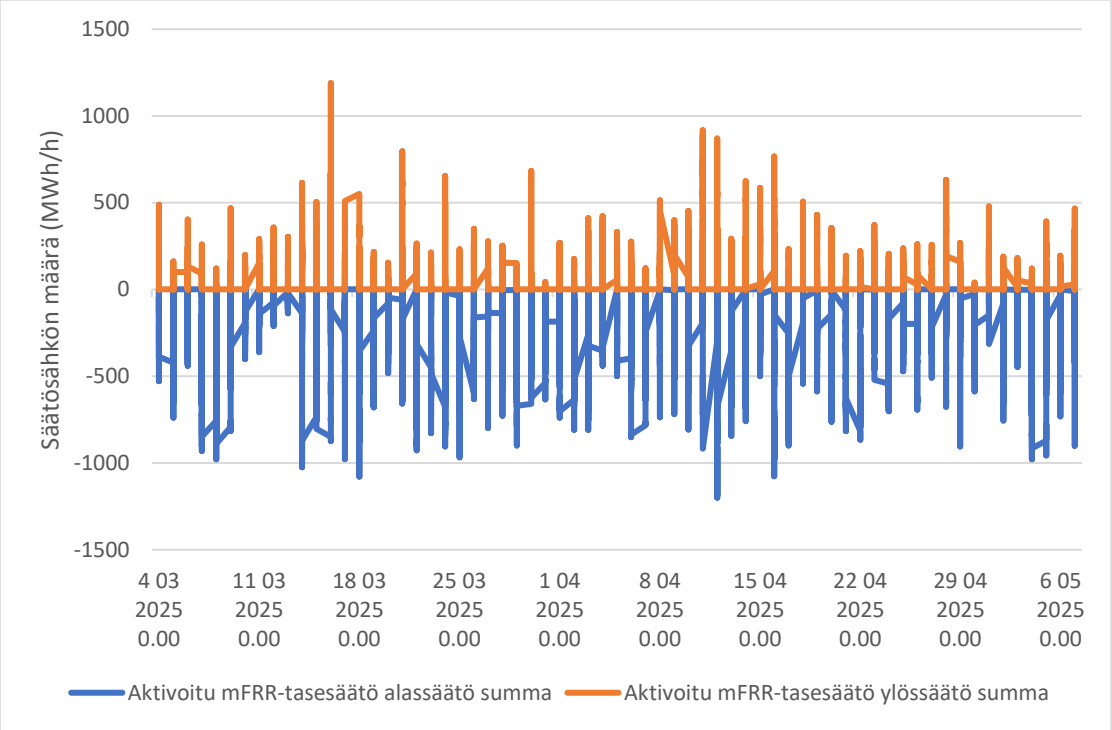
Tasepoikkeamien hallinta on kuitenkin muuttunut viime vuosina aiempaa haastavammaksi sähköjärjestelmän muutosten myötä. Uusiutuvan tuotannon kapasiteetin kasvun lisäksi vuoden 2023 toukokuussa siirryttiin 15 minuutin taseselvitysjaksoihin. Vuoden 2025 maaliskuusta alkaen myös säätötarjousten jättö, valinta ja aktivointi on pidetty 15 minuutin jatkoissa. Muutokset yhdessä tarkoittavat, että sähköntuottajien ja -toimittajien on pystyttävä ennakoimaan ja reagoimaan omiin tasepoikkeamiin entistä tarkemmin.

Muutokset ovat näkyvissä myös säätösähkön määrissä sekä sen hintavaihtelussa. Kuvassa 9 on esitetty säätösähkön määrien vaihtelua ennen 15 minuutin resoluution siirtymistä. Tarvittava säätösähkön on pääasiassa pysynyt vakaana, mutta muutamia suurempia piikkejä on havaittavissa. Suurin ylössäädön määrä on ollut hieman yli 600 MWh/h, ja alassäätöä on tarvittu enimmillään noin -800 MWh/h. Alassäädölle on myös kokonaisvaltaisesti ollut hieman ylössäätöä enemmän tarvetta. (Fingrid 2026e)



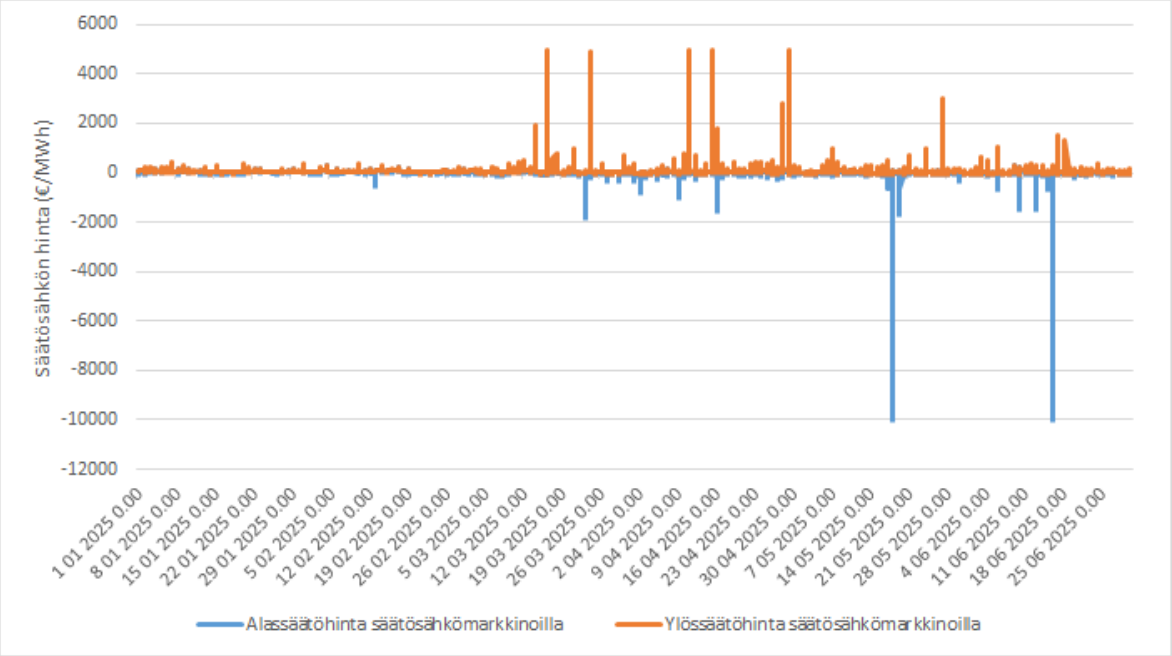
Kuva 9: Säätösähkön määrien vaihtelu ennen 15 minuutin resoluutioon vaihtamista (Fingrid 2026e)

Kuvassa 10 taas on kuvattu säätösähkön määrän vaihtelua 15 minuutin resoluutioon vaihtamisen jälkeen. Kuvaajasta on huomattavissa, miten tarvittavan energian vaihtelu on paljon suurempaa. Sen lisäksi, että tasepoikkeama vaihtelee hyvin nopeasti, myös suurimmat piikit ovat kasvaneet. Sekä ylös- että alassäädön määrät ovat enimmillään yli 1000 MWh/h, eli järjestelmän tasapaino vaihtelee muutoksen jälkeen huomattavasti herkemmin. (Fingrid 2026a)



Kuva 10: Säätösähkön määrien vaihtelu 15 minuutin resoluution vaihtamisen jälkeen (Fingrid 2026a)

Tasehallinnan muutokset ovat näkyvissä myös säätösähkön hinnoissa. Kuvasta 11 on nähtävissä, miten maaliskuun 2025 siirtymä 15 minuutin resoluutioon on lisännyt merkittävästi hintavaihtelua. Aikavälillä 4.3.-30.6.2025 ylössäätösähkön hinnan keskiarvo on ollut 64 €/MWh ja alassäätösähkön keskiarvo on ollut -3,75 €/MWh. Samalla aikavälillä säätösähkön vastaavat keskihajonnat ovat kuitenkin olleet 223 €/MWh ja 288 €/MWh. Säätösähkön hinnasta on siis tullut erittäin vaihtelevaa, ja suurimmat hintapiikit ovat erittäin suuria. Ylössäädölle on vuoden 2025 alkupuolella nähty muutamia vartteja, jolloin sähkön hinta on ollut 5 000 €/MWh. Vastaavasti alassäädön hinta on käynyt kaksi kertaa jopa -10 000 €/MWh tasolla. (Fingrid 2026d)



Kuva 11: Säätösähkön hintavaihtelua vuoden 2025 alkupuoliskolta (Fingrid 2026d)

Voimakas tasesähkön hintavaihtelu kuvastaa sitä, miten kulutuksen ja jouston tasapainottaminen on entistä vaikeampaa. Muutokset ovat kokonaisuudessaan lisänneet sähköntoimittajien todennäköisyyttä tasepoikkeamiin, joka kasvattaa toimittajien riskiä ja tasehallinnan kustannuksia. Poikkeamien korjaamiseksi kantaverkkoyhtiö hankkii reservikapasiteettia, jota voidaan aktivoida taajuuden muuttuessa. Suomessa Fingrid hankkii tasepoikkeamista veloittamallaan rahalla markkinaehtoisesti reservejä, joita voivat olla esimerkiksi tuotantolaitoksia, kulutuskohteita tai sähkövarastoja. (Fingrid 2024g)

Reservituotteita on yhteensä viisi, ja ne aktivoituvat eri aikaväleillä sen mukaan, miten nopeasti taajuuden poikkeama on korjattava. Ne voidaan jakaa kahteen pääryhmään: tehoreserveihin ja energiareserveihin. Tehoreserveihin kuuluvat FFR sekä kaksi FCR-tuotetta, FCR-N ja FCR-D. Energiatuotteisiin puolestaan kuuluvat mFRR ja aFRR. FFR osallistuu vain ylössäätöön, FCR-N on symmetrinen eli se voi toimia sekä ylös- että alassäädössä, ja muut tuotteet on jaettu erikseen alas- ja ylössäätötuotteisiin. Eri tuotteilla on erilaiset tekniset vaatimukset ja aktivointiajat, mikä määrittää niiden roolin taajuuden hallinnassa ja sähköjärjestelmän vakauden turvaamisessa. Taulukossa 3 on kuvattu eri tuotteet, aktivointinopeudet, aktivointitavat sekä säätösuunnat. (Fingrid 2024i)

Taulukko 3: Reservituotteiden aktivointi ja säätösuunta (Fingrid 2024i)

Reservituote	**Aktivointinopeus**	**Aktivointitapa**	**Säätösuunta**
FFR nopea taajuusreservi (fast frequency reserve)	~1 sekunti	Taajuusmittaukseen perustuva automaattinen aktivointi	Vain ylössäätö
FCR-D Taajuusohjattu häiriöreservi (Frequency containment reserve for disturbances)	7,5 sekuntia	Taajuusmittaukseen perustuva automaattinen aktivointi	Epäsymmetrinen. Hankitaan erikseen ylös- sekä alassäätötuotetta. (FCR-D ylös ja FCR-D alas
FCR-N Taajuusohjattu käyttöreservi (Frequency containment reserve for normal operation)	1 minuutti	Taajuusmittaukseen perustuva automaattinen aktivointi	Symmetrinen tuote. Aktivoidaan taajuuden mukaan sekä ylös että alas
aFRR Automaattinen taajuuden palautusreservi (automatic frequency restoration reserve)	5 minuuttia	Fingridin lähettämä automaattinen aktivointisignaali	Epäsymmetrinen. Hankitaan erikseen ylös- sekä alassäätötuotetta (aFRR ylös ja aFRR alas)
mFRR Manuaalinen taajuuden palautusreservi (manual frequency restoration reserve)	12,5 minuuttia	Fingridin lähettämä manuaalinen aktivointisignaali	Epäsymmetrinen. Hankitaan erikseen ylös- sekä alassäätötuotetta (mFRR ylös ja mFRR alas)

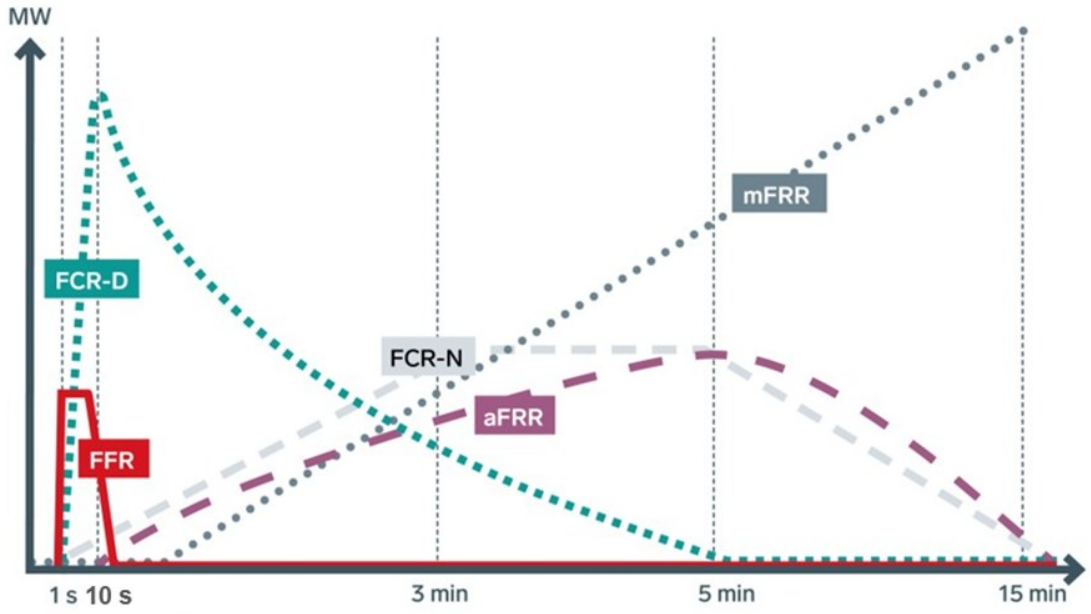
FFR on nopein reservituote, ja se on tarkoitettu vain ylössäätöön. Tuotetta ei hankita kaikille tunneille, vaan Fingrid hankkii tuotetta vain silloin, kun sähköjärjestelmän inertia on alhainen ja äkillisen taajuuspoikkeaman riski suuri. Aktivointi tapahtuu noin sekunnin sisällä taajuuden poiketessa määritellystä rajasta, ja kestää tyypillisesti vain muutamia kymmeniä sekunteja. (Fingrid 2024d) FFR on ensimmäinen suoja, joka hidastaa taajuuden laskua ja antaa muille reserveille aikaa reagoida. Nopean aktivointiaikansa takia markkinalle voivat osallistua lähes ainoastaan energiavarastot, mutta myös kulutuksella katetaan osa reservitarpeesta (Fingrid 2020).

FCR-N on ainoa jatkuvasti käytössä oleva reservituote, joka on aina aktivoituna sähköjärjestelmän taajuuden pysymiseksi normaalialueella 49,9–50,1 Hz. Tuote on symmetrinen, eli se voi sekä lisätä että vähentää tehoa taajuuden poikkeaman suunnan perusteella. Aktivointi perustuu automaattiseen taajuusmittaukseen, ja vaste tapahtuu noin minuutissa. (Fingrid 2024b) FCR-N tuote siis ylläpitää verkon perusvakautta, ja siihen osallistuvat ensisijaisesti vesivoimalaitokset sekä energiavarastot, jotka molemmat pystyvät jatkuvaan sekä tarkkaan säätöön molempiin suuntiin. (Fingrid 2017d)

FCR-D on tarkoitettu suurempien ja äkillisempien taajuuspoikkeamien hallintaan. Tuote on jaettu kahteen erilliseen osaan: FCR-D ylös ja FCR-D alas. Ylössäätö aktivoituu, kun taajuus laskee alle 49,9 Hz ja alassäätö, kun taajuus nousee yli 50,1 Hz. Aktivointi tapahtuu automaattisesti 7,5 sekunnin kuluessa taajuusmuutoksesta. (Fingrid 2024c) FCR-N tuotteen tavoin myös FCR-D reservissä on paljon vesivoimaa sekä energiavarastoja, mutta myös kulutusta osallistuu FCR-D markkinoille. Lisäksi FCR-D alas tuotteeseen osallistuu myös voimalaitokset, jotka voivat ajaa tuotantoaan alas taajuuden poiketessa. (Fingrid 2017d)

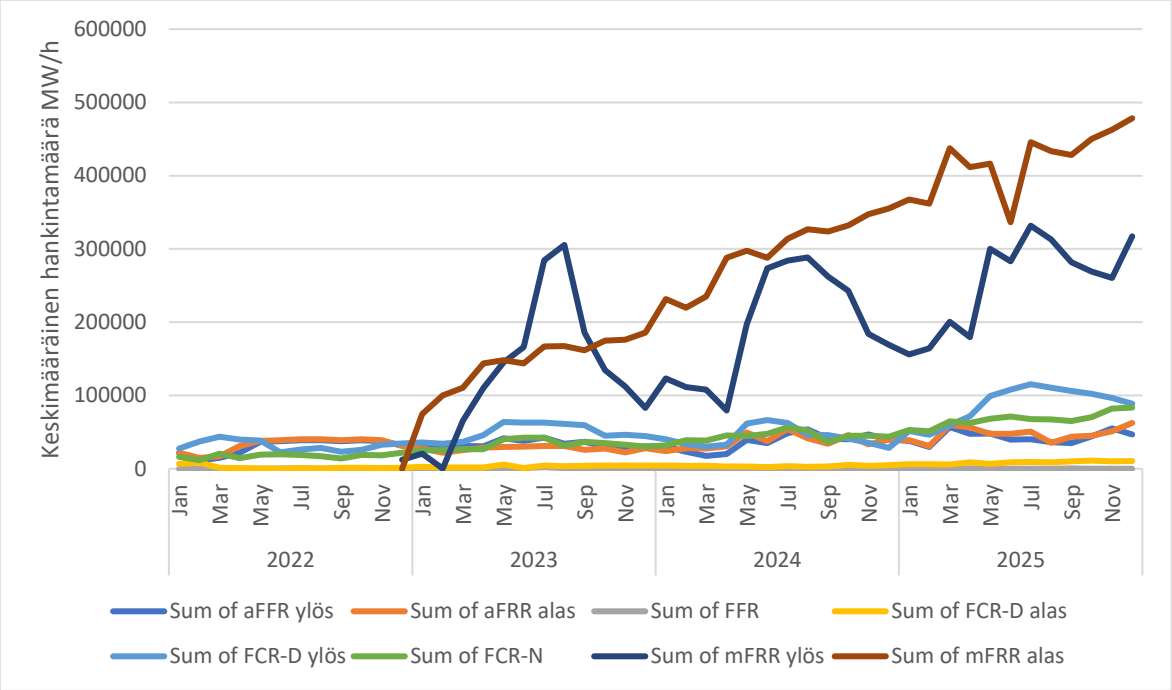
aFRR on automaattinen taajuuden palautusreservi, joka toimii FCR-tuotteiden jälkeen. Sen tehtävä on palauttaa taajuus takaisin nimellisarvoonsa ja siten vapauttaa FCR-reservit jälleen käyttövalmiuteen. Aktivointi tapahtuu automaattisesti Fingridin lähettämän ohjaussignaalin perusteella ja aktivointiaika on enintään 5 minuuttia. aFRR on epäsymmetrinen tuote, ja sitä hankitaan erikseen sekä ylös- että alassäätöön. (Fingrid 2024a) Osallistujina aFRR markkinalle ovat ensi sijassa vesivoima, kulutus sekä energiavarastot, mutta myös tuulivoimalla osallistutaan aFRR säätöön. (Fingrid 2017a)

mFRR eli manuaalinen taajuudenpalautusreservi on taajuuden palauttamisen perusta. aFRR tuotteen tavoin, sen tarkoituksena on palauttaa taajuus ja tase pidemmällä aikavälillä. Aktivointi tapahtuu Fingridin manuaalisella ohjauksella, ja vasteaika on korkeintaan 12,5 minuuttia. Myös mFRR on epäsymmetrinen tuote, joten siihen voi osallistua joko ylössäädöllä tai alassäädöllä. (Fingrid 2024e) Pidemmän vasteajan ansiosta mFRR markkinoille voi osallistua myös hitaammat joustoresurssit, kuten voimalaitokset sekä teollisuus. Kuvassa 12 on kuvattu reservituotteiden toiminta kokonaisuutena taajuuspoikkeaman sattuessa. Kuvasta on nähtävissä, miten nopeimpia reservejä vapautetaan, kun hitaammat reservit aktivoituvat.



Kuva 12: Reservituotteiden toiminta kokonaisuutena (Fingrid 2024j)

Uusiutuvien energianlähteiden sekä energiamurroksen takia reservien hankintamäärät ovat kasvaneet rajusti. Kuvassa 13 on esitetty kaikki reservituotteet ja niiden keskimääräiset hankintamäärät vuoden 2022 alusta vuoden 2025 puoleenväliin. Kuvaajasta on huomattavissa, miten erityisesti mFRR tuotteiden hankintamäärät ovat lähteneet nousuun vuodesta 2023 lähtien. FCR tuotteiden hankintamäärät ovat pysyneet pitkään tasaisena, mutta vuoden 2025 alkupuolella on nähtävissä nousutrendiä, joka luultavasti johtuu tasevirheiden lisääntyneestä määrästä.



Kuva 13: Reservituotteiden tarpeen kasvu (Fingrid 2026b)

Spot-hintojen tavoin myös reservituotteiden hinnat määräytyvät jokaiselle tunnille kysynnän ja tarjonnan mukaan. Hinnoittelu perustuu marginaalihinnoitteluun, eli tarjouksia hyväksytään edullisimmasta alkaen siihen asti, että hankintatarve saadaan katettua. Kallein hyväksytty tarjous maksetaan kaikille kyseisen tuotteen hyväksytyille tarjouksille. Yksittäisten tuotteiden hinnoissa voi siten ilmetä suurtakin vaihtelua tunnista toiseen. Yleistä reservituotteiden hintatasoa sekä hintavaihtelua on kuvattu taulukossa 4, jossa on esitetty jokaisen reservituotteen keskihinnat sekä keskihajonnat vuodelta 2024. FFR tuotteen kohdalla tulee huomioida, että tuotetta ei hankita jokaiselle tunnille, jolloin vuoden aikana esiintyvät 0-tunnit laskevat keskihintaa reilusti. FCR-N markkinan kohdalla tulee muistaa, että kyseessä on symmetrinen tuote, joka selittää tuotteen korkeamman hintatason. Käytännössä yhdestä resurssista voidaan tarjota vain puolet, joka tulee huomioida myös hintatarkastelussa.

Taulukko 4: Reservituotteiden keskihinnat vuodelta 2024 (Fingrid 2026c)

Reservituote	Vuoden 2024 keskihinta (€/MWh)	Vuoden 2024 keskihajonta (€/MWh)
FFR	0,9	1,1
FCR-D alas	16,6	41,4
FCR-D ylös	17,3	29,5
FCR-N	45,8	46,8
aFRR alas	22,2	18,2
aFRR ylös	24,8	25,6
mFRR alas	14,9	9,5
mFRR ylös	11,3	7,9

Keskihajontoja tarkastelemalla on havaittavissa, miten erityisesti FCR tuotteiden hintataso vaihtelee muita tuotteita huomattavasti enemmän. Tätä selittää Fingridin vaihteleva tarve reservituotteen hankkimiselle. Häiriöreservejä tulee hankkia enemmän silloin, kun taajuuden poikkeaman todennäköisyys on suurempi. mFRR tuotteissa taas keskihajonta on pienempi, joka kuvastaa parempaa tunnittaista kysynnän ja tarjonnan kohtaamista. mFRR on kaikkein hitaimmin aktivoituva reservituote, joten sen tarjonta on laaja, mikä osaltaan myös selittää pienemmän hintavaihtelun.

Yhteenvetona sähköverkon taajuuden ylläpito ei siis perustu yhteen markkinaan, vaan tasoitus on markkinapohjaisesti jakautunut useille tasapainotusmekanismeille. Spot-markkina toimii järjestelmän ennustetasona, jossa myös yksityiskuluttajat voivat vaikuttaa järjestelmän tasapainoon kysyntäjouston avulla. Spot-markkina perustuu kuitenkin arvioihin tulevasta kulutuksesta ja tuotannosta, joita tarkennetaan vuorokauden aikana intraday-markkinoiden kautta. Intraday-kauppa mahdollistaa viime hetken hienosäädön ennen fyysistä toimitusta, jotta sähkötoimittajat voivat minimoida tasepoikkeamiaan jo ennen reservimarkkinan tarvetta.

Toimitushetkellä tasepoikkeamien hallinnan vastuu siirtyy kantaverkkoyhtiölle, joka aktivoi ostamiaan reservejä taajuuden ja tasevirheiden mukaan. Nopeimmat taajuuteen perustuvat reservit toimivat automaattisesti korjaten lyhytaikaisia poikkeamia, jota voidaan ajatella taajuuden kohinana. Näiden lisäksi suurempia tasepoikkeamia korjaa aFRR ja mFRR markkinat, jotka palauttavat kulutuksen ja tuotannon tasapainon. Reservitoiminnasta aiheutuvat kustannukset kohdennetaan lopulta taseselvityksessä tasepoikkeaman aiheuttajille. Näin

varmistetaan, että markkinatoimijoilla säilyy kannustin minimoida poikkeamat ja joustaa kaikilla mahdollisilla markkinapaikoilla.

2.4 Kysyntäjousto ja sen rooli energiajärjestelmässä

Uusiutuvan energiantuotannon kasvu vaikeuttaa sähköverkon tasapainottamista pelkällä tuotannon säädöllä. Tämä tarkoittaa, että tasapainotus tulee siirtää kulutukseen, jotta kysyntä ja tarjonta voivat kohdata. Kysyntäjousto tarkoittaa kulutuksen väliaikaista vähentämistä, siirtämistä tai lisäämistä sähköjärjestelmän tarpeiden mukaisesti. Pääasiallisia keinoja ovat kuorman leikkaus sekä kuorman siirto. Kuorman leikkauksessa sähkön kulutusta vähennetään esimerkiksi huippukuormituksen aikana, kun taas kuorman siirrossa kulutusta siirretään ajankohtiin, jotka ovat edullisempia tai muuten järjestelmän kannalta suotuisia. (Xu et al. 2017) Näiden keinojen avulla kulutus mukautuu tarjonnan vaihteluihin tuotannossa ja vähentää tarvetta pitää käyttövalmiina kalliita ja päästöintensiivisiä varavoimalaitoksia.

Sridhar et al. (2022) tutkimuksen mukaan, kysyntäjousto tuo useita eri hyötyjä sekä yksittäisille kuluttajille että sähköverkolle kokonaisuudessaan. Kuluttajille se tarjoaa mahdollisuuden säästää sähkökustannuksissa, sillä kulutusta voidaan siirtää ajankohtiin, jolloin sähkömarkkinahinnat ovat alhaisemmat. Pörssisähkösopimuksia hyödyntävien kotitalouksien havaittu hintajousto on keskimäärin noin 100 W jokaista 100 €/MWh hinnanmuutosta kohden (Haakana et al. 2024) , mikä osoittaa, että myös pienasiakkailla on mitattavissa oleva, hinnan ohjaama reagointikyky.

Vaikka yksittäisen kotitalouden joustomäärä on pieni, aggregoituna vaikutus muodostuu merkittäväksi. Kun suuri joukko pieniä kuormia reagoi samanaikaisesti hintasignaaleihin, kokonaiskuormitus tasaantuu ja huipputehon tarve pienenee. Järjestelmätasolla tämä parantaa toimitusvarmuutta ja vähentää tarvetta mitoittaa siirtoverkkoja ja tuotantokapasiteettia harvinaisten huippukuormitustilanteiden mukaan. (Neves Motta, Anjos & Gendreau 2023; Sridhar et al. 2022) Kysyntäjousto toimii siis virtuaalisena varavoimana, joka vapauttaa olemassa olevaa kapasiteettia kriittisiin käyttötilanteisiin ja vähentää myös infrastruktuuri-investointien tarvetta.

Laajemmassa mittakaavassa kysyntäjoustolla voidaan myös vähentää sähköenergian hiilidioksidipäästöjä (Sridhar et al. 2022). Kun kulutusta siirretään ajankohtiin, jolloin tuuli- ja

aurinkovoimaa on runsaasti, myös käytetyn sähkön päästöintensiteetti alenee. Samalla jousto mahdollistaa uusiutuvan tuotannon määrän kasvattamisen, sillä uusiutuvaa energiantuotantoa voidaan lisätä ilman, että niiden vaihtelut muodostuvat vakaviksi riskeiksi. Näin ollen kysyntäjousto on tärkeä osa energiamurroksen tehokkuudessa.

International Energy Agency (2024) on kehittänyt kuusivaiheisen viitekehyksen uusiutuvan energiantuotannon integraatiolle. Viitekehys kuvaa miten sähköjärjestelmän on kehityttävä vaiheittain, jotta järjestelmän vakaa toiminta voidaan turvata uusiutuvan energiantuotannon osuuden kasvaessa. Viitekehyksen vaiheet sekä niiden vaikutukset sähköjärjestelmälle on kuvattu taulukossa 5. Taulukossa mainittu nettokuorma tarkoittaa sähköjärjestelmän kokonaissähkökuormaa vähennettynä hetkellisellä uusiutuvan energiantuotannolla, eli sitä osaa kysynnästä, joka täytyy kattaa perinteisillä tuotantolähteillä tai kysyntäjoustolla.

Taulukko 5: IEA:n uusiutuvan energiantuotannon integraation vaiheet (IEA 2024)

Vaihe	**Uusiutuvan tuotannon vaikutus sähköjärjestelmään**	**Kuorman ja nettokuorman suhde**	**Haasteet**
Vaihe 1	Ei merkittävää vaikutusta	Ero kuorman ja nettokuorman välillä minimaalinen	Uusiutuvan tuotannon vaikutukset ovat paikallisia, eikä suuria haasteita ole
Vaihe 2	Pieni vaikutus	Ero kuorman ja nettokuorman välillä havaittavissa	Tarve tahtimoottoreiden säädölle, ennustamisen integrointi riittää
Vaihe 3	Määrittelee järjestelmän toimintaa	Keskipäivällä nettokuorma selvästi alhaisempi	Epävarmuus ja vaihtelu nettokuormassa kasvaa, joustavaa kapasiteettia tarvitaan
Vaihe 4	Uusiutuva tuotanto kattaa ajoittain suurimman osan kysynnästä	Muutamien tuntien aikana lähes koko kysyntä katettu uusiutuvalla tuotannolla	Järjestelmän vakauden ylläpidon tärkeys korostuu, tasapainotus vaatii edistyneitä ratkaisuja
Vaihe 5	Merkittäviä ylijäämiä vuoden aikana	Uusiutuva tuotanto paikoin ylittää paikallisen kysynnän	Ylijäämän hallinta vaatii kysyntäjoustoja, energian varastointia, verkkoinvestointeja ja laajempia vakautusratkaisuja
Vaihe 6	Lähes koko sähköntarve turvattu uusiutuvalla tuotannolla	Pitkät jaksot vähäistä uusiutuvaa tuotantoa, tarve kompensoida varastoinnilla ja säädettävällä tuotannolla	Järjestelmä pääosin muuntajakytkettyjen resurssien varassa, vaatii pitkäkestoista varastointia ja sähköntuontia/vientiä

Suomen ja muiden pohjoismaiden nykyinen tilanne vastaa parhaiten vaihetta 4. Uusiutuvan tuotannon määrä voi paikoin ylittää paikallisen kysynnän, ja järjestelmän tasapainotus on tärkeää. Mitä pidemmälle viitekehyksen vaiheissa edetään, sitä tärkeämmäksi myös kysyntäjouston merkitys korostuu. Toistaiseksi kuluttajan vaihtoehdot osallistua sähkön kysyntäjoustoon ovat kuitenkin rajoittuneet pitkälti spot-markkinoille. Fingridin arvion mukaan kulutusjouston määrä spot-markkinoilla on suurempi kuin muilla markkinoilla yhteensä (Fingrid 2017c). Energiamurroksen ja uusiutuvan energiatuotannon kannalta on kuitenkin tärkeää, että kulutusjousto lisääntyy myös muilla markkinoilla.

IEA:n viitekehyksen näkökulmasta nykyisen kaltainen spot-hintaan perustuva kulutusjousto toimii tärkeänä ensimmäisenä askeleena kohti joustavampaa sähköjärjestelmää. Se mahdollistaa kysynnän mukauttamisen markkinasignaaleihin, mutta ei yksin riitä ratkaisemaan tasapainotusongelmia järjestelmän siirtyessä kohti suurempaa uusiutuvan tuotannon osuutta. Spot-hintoihin perustuva jousto reagoi pääosin energian hinnan vaihteluihin, ei sähköverkon todellisiin kuormitushuippuihin tai taajuuspoikkeamiin. Tämä voi kuitenkin vain siirtää kulutuspiikin tunnilta toiselle sen sijaan, että se tasoittuisi. Lisäksi spot-markkina ei huomioi sähkönjakelun paikallisia rajoitteita tai järjestelmän hetkellisiä tehotarpeita.

Tehoperusteinen hinnoittelu on yksi keinoista, joka kannustaa joustoon myös tehon näkökulmasta. Tehoperusteisessa hinnoittelussa kuluttajaa laskutetaan käytetyn hetkellisen huipputehon perusteella energiamäärän sijaan. Tämä kannustaa tasaisempaan sähkönkäyttöön ja ehkäisee kulutuspiikkejä, jotka voivat kuormittaa verkkoa ja lisätä hiilipohjaisen varavoiman tarvetta. (Haapaniemi et al. 2025) Käytännössä tehoperusteinen maksumalli ohjaa kuluttajaa huomioimaan samanaikaisesti sekä spot-hinnat että oman kulutuksen hetkelliset huiput, jolloin kulutus mukautuu koko sähköjärjestelmän kannalta tehokkaammin.

Kulutusjouston mahdollisuuksia muilla markkinoilla on viime aikoina tutkittu ja kehitetty aktiivisesti. Suomessa kulutusjousto reservimarkkinoilla on perinteisesti rajoittunut suurteollisuuteen, kuten metsä-, metalli- ja kemianteollisuuteen, mutta viime vuosina myös kotitalouksen ja pienyritysten osallistuminen on lisääntynyt. Pienet toimijat voivat osallistua reservimarkkinoille niin kutsuttujen aggregaattoreiden avulla, jotka yhdistävät useat pienet joustavat kuormat yhdeksi kokonaisuudeksi, joka voi osallistua säätösähkö- ja reservimarkkinoille. Tämä mahdollistaa pienempien kuormien lisäämisen kysyntäjoustoon ilman suuria investointeja tai tarjousten jättämisen monimutkaisuutta. (Fingrid 2017c)

Aggregaattoreita on markkinoilla useita, ja ne voidaan karkeasti jakaa kahdenlaisiin. Aggregaattoreihin ilman tasevastaavuutta sekä tasevastaaviin. Ilman tasevastaavuutta toimivat aggregaattorit voivat toimia vain FCR markkinoilla, sillä muille markkinoille osallistuminen vaatii toistaiseksi tasevastaavuuden. Tasevastaavana toimivat aggregoijat voivat osallistua myös eri FRR markkinoille sekä päivän sisäisille intraday-markkinoille. Useamman markkinan ansiosta tasevastaavat aggregoijat voivat saavuttaa suurempia kokonaistuottoja hyödyntämällä joustoa aina niillä markkinoilla, joilla hinnat ovat korkeimmillaan. Tämä mahdollistaa joustoresurssin optimoinnin eri markkinoiden välillä, esimerkiksi reservimarkkinoiden ja sähkön spot- ja intraday-markkinoiden kesken, mikä parantaa jouston taloudellista arvoa verrattuna yhden tai kahden markkinan käyttöön.

Toisaalta tasevastaavana toimiminen lisää toiminnan monimutkaisuutta ja kustannuksia. Aggregoijan on hallittava tasetta tarkasti, laadittava ennusteita kysynnästä ja tuotannosta sekä varauduttava poikkeamiin, jotka voivat aiheuttaa sopimussanktioita tai taloudellisia menetyksiä. Lisäksi tasevastaavana toimivat aggregoijat kantavat suuremman osan markkina- ja hintariskeistä, mikä voi heijastua palvelumaksuissa tai vaatia tiukempia sopimusehtoja asiakkailta. Korkeammat tuotot tasevastaavan mallilla kulkevat siis käsi kädessä lisääntyneiden operatiivisten ja taloudellisten vaatimusten kanssa.

Kokonaisuutena kysyntäjousto on keskeinen osa energiajärjestelmän sopeutumista kohti hajautettua ja uusiutuvaa tuotantorakennetta. Sen avulla voidaan hallita sekä energian että tehon näkökulmasta syntyviä haasteita, vähentää verkon kuormitusta ja pienentää päästöintensiivisen tuotannon tarvetta. Kysyntäjouston merkitys korostuu erityisesti, kun järjestelmä etenee IEA:n määrittämissä integraatiovaiheissa kohti tilanteita, joissa uusiutuva tuotanto kattaa ajoittain lähes koko kulutuksen. Tällöin kulutusjousto ei ole enää vain taloudellinen kannustin yksittäisille kuluttajille, vaan välttämätön osa sähköjärjestelmän tasapainon ja toimitusvarmuuden ylläpitoa. Jatkuva kehitys esimerkiksi tehoperusteisen hinnoittelun ja aggregaattorimallien suuntaan mahdollistaa jouston laajemman hyödyntämisen kaikilla markkinatasoilla ja eri kuluttajaryhmissä, mikä tukee koko energiamurroksen tavoitteita.

3 Virtuaalivoimala ja sen toimintaperiaatteet

Virtuaalivoimalalla tarkoitetaan hajautetun energiantuotannon, kulutuksen ja varastoinnin kokonaisuutta, jota ohjataan keskitetysti yhtenä resurssina sähkömarkkinoilla. Virtuaalivoimalan avulla voidaan optimoida kiinteistön energiajärjestelmien toimintaa, vähentää kustannuksia sekä osallistua sähkömarkkinoiden joustomekanismeihin. Tässä luvussa esitellään diplomityössä tarkasteltavan virtuaalivoimalan keskeiset osat sekä niiden toimintaperiaatteet ja hyödyt. Näitä osia ovat kiinteistöakku, hybridilämpövoimala sekä älykäs energianohjausjärjestelmä.

3.1 Kiinteistöakku

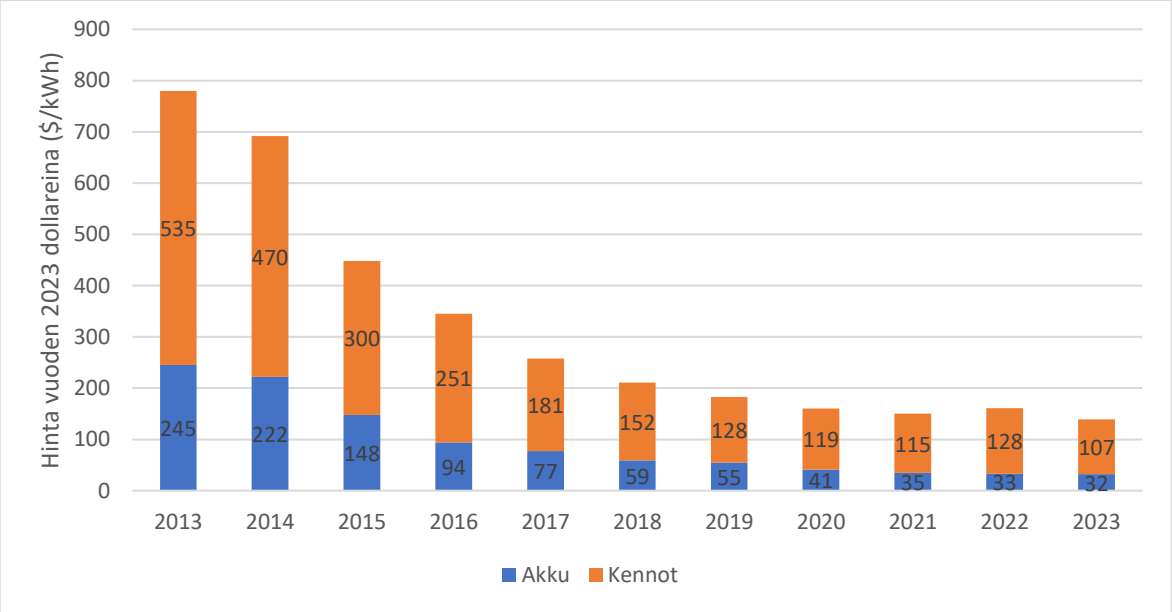
Energiavarastolla tarkoitetaan järjestelmää, joka pystyy varastoimaan energiaa ja vapauttamaan sitä tarpeen mukaan. Energiavarasto toimii siten puskurina tuotannon ja kulutuksen välillä, mahdollistaen joustavamman energiankäytön. Energiaa voidaan varastoida mekaanisesti, lämpönä, sähköisesti, kemiallisesti tai sähkökemiallisesti. (Andújar Márquez 2023, 6–7) Rakennusten energiavarastoista lämmön varastointi on tuttu lämminvesivaraajien muodossa. Viime vuosina kiinnostus on kuitenkin kasvanut myös sähkökemiallisiin varastoihin eli akustoihin, joita voidaan hyödyntää erityisesti sähkönkulutuksen tasaamisessa ja uusiutuvan energian tuotannon vaihteluiden hallinnassa.

Sähkökemialliset energiavarastot ovat kehittyneet viime vuosikymmeninä sähköistymisen rinnalla. Käytetyimpiä akkutyyppejä ovat litiumioniakut, lyijyakut sekä joissain tapauksissa nikkeli- tai natriumpohjaiset akut. Litiumioniteknologia on tällä hetkellä selvästi sekä teknisesti kehittynein ratkaisu. (Linja-Aho et al. 2024, 7–8) Eri akkuteknologioiden ominaisuuksia on esitetty taulukossa 6. Litiumioniakut ovat teknologialtaan parempia joka parametrilla ja erityisesti elinikä voi olla muihin teknologioihin verrattuna jopa neljä kertaa enemmän syklejä. Näiden etujen takia tässä työssä keskitytään erityisesti litiumioniteknologiaan pohjautuviin kiinteistöakustoihin.

Taulukko 6: Eri akkuteknologioiden keskeiset ominaisuudet (Andújar Márquez 2023, 64–65)

Ominaisuus	Lyijyakku	Litiumioniakku	Nikkeliakku
Hyötysuhde (%)	60–95	85–97	60–91
Syklien kesto	500–2 500	1 000–10 000	2 000–2 500
Energiatiheys (Wh/kg)	30–50	75–265	45–80

Hyvien ominaisuuksien ansiosta litiumioniakut ovat yleistyneet niin kannettavissa elektroniikkalaitteissa kuin sähköautoissakin ja yleistymisen ansiosta myös teknologian hinnat ovat laskeneet. Litiumioniakustojen hintakehitystä on esitetty kuvassa 14. Hintojen lasku on ollut erittäin nopeaa 2020-luvulle asti, mutta sittemmin hintakehitys on tasaantunut. Tasaantumisen syynä voivat kuitenkin olla 2020-luvun kriisit kuten koronapandemia sen seurauksena komponenttipula, jolloin hintakehityksen voidaan olettaa laskevan lisää tulevaisuudessa.



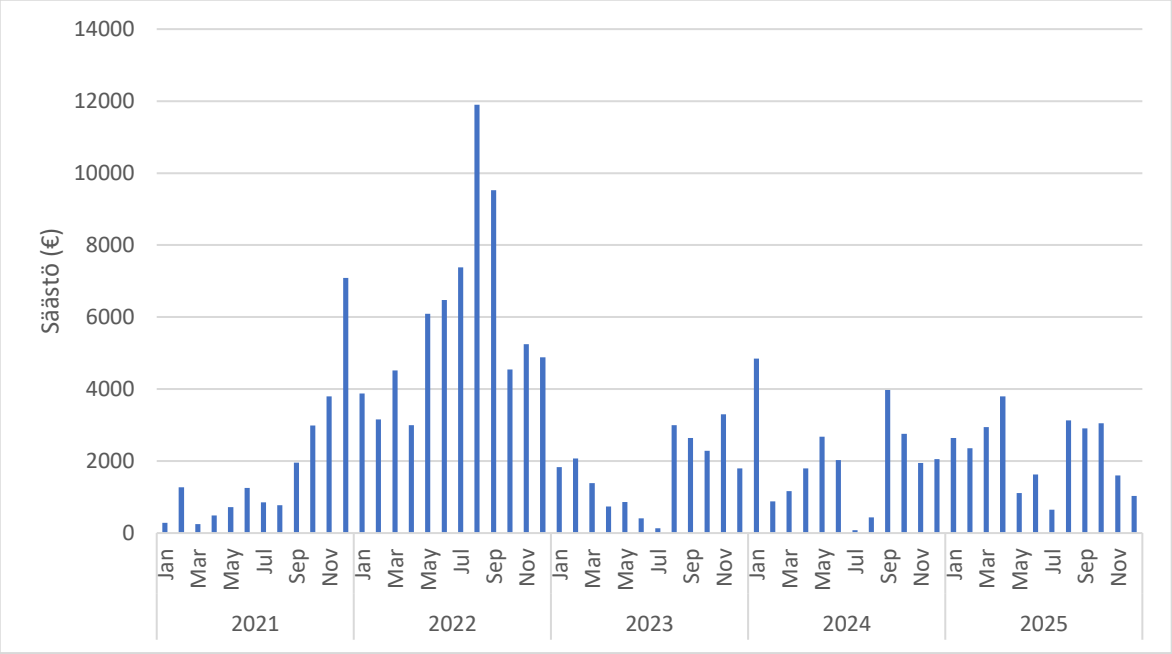
Kuva 14: Litiumioniakustoteknologian hintakehitys vuoden 2023 dollareina (Linja-Aho et al. 2024, 13)

Kiinteistöakusto koostuu useista akkumoduuleista, jotka puolestaan rakentuvat monista yksittäisistä akkukennoista. Akuston lisäksi kokonaisuuteen sisältyy verkkovaihtosuuntaaja, akunhallintajärjestelmä (Battery Management System, BMS), jäähdytys- ja suojausjärjestelmät sekä sähkönjakelun turvakomponentit. (Linja-Aho et al. 2024, 7) Nämä varmistavat akuston turvallisen ja luotettavan toiminnan, mutta nostavat luonnollisesti myös kustannuksia.

Akusto voidaan asentaa kiinteistöön joko teknisiin tiloihin, ulkokonttiin tai erilliseen suoja-aitaukseen. Konttiratkaisu on erityisen yleinen vaihtoehto, sillä se mahdollistaa palosuojan integroimisen suoraan konttiin, helpottaa akuston modulaarista laajentamista sekä helpottaa myös huoltoa ja siirrettävyyttä. Akusto liitetään kiinteistön sähköjärjestelmään pääkeskuksen yhteyteen, jolloin se voi toimia sekä kulutuksen tasaajana kiinteistölle että reservijärjestelmänä kantaverkossa. (Linja-Aho et al. 2024, 21–23) Tässä työn laskelmissa käytetään jatkossa 1 MW / 1 MWh kokoista akustoa.

Akuston ansaintalogiikka perustuu yksinkertaisuudessaan siihen, että energiaa ladataan ja puretaan hintasignaalien mukaisesti. Käyttötapoja tämän saavuttamiseksi on kuitenkin useita. Day-ahead, eli spot-markkinat ovat selkein käyttökohde, jossa sähköä ladataan halpojen varttien aikaan, ja puretaan sähkön hinnan ollessa korkeampi. Näin ollen akustolla saadaan tasapainotettua ostosähkön hintavaihtelua ja laskettua ostosähkön keskihintaa. Spot-markkinoiden käyttö on kuitenkin rajallista, sillä akkujen degradaatio eli kuluminen sykleittäin pienentää pitkän aikavälin tuottoa.

Olettamalla sähkövaraston syklikestoksi 8 000 sykliä ja hankintahinnaksi 500 000 €, tuottovaade yhdelle lataus-purkusyklille olisi 63 € / sykli, jotta syklin tekeminen on kannattavaa. Tämä tarkoittaa, että kulutuksen siirtoa ei kannata tehdä, ellei päivän edullisimman ja kalleimman tunnin välinen hintaero ole yli 63 €/MWh. Kuvassa 15 on esitetty kulutuksensiirrosta aiheutuneet säästöt vuosina 2021–2025, kun kulutusta olisi siirretty kannattavina päivinä 1 MWh kalleimmalta tunnilta edullisimmalle. Akuston syklin energiahäviöitä ei ole huomioitu, joten todellisuudessa rahallinen hyöty on hieman pienempi.



Kuva 15: 1 MW kulutuksensiirron säästöt kuukausittain

Kuvaajasta on nähtävissä, miten vuonna 2022 on ollut selvästi enemmän säästöpotentiaalia muihin vuosiin verrattuna, jota selittää erityisesti yleinen sähkön korkea hintataso. Yhteensä neljän vuoden aikana säästöpotentiaalia olisi ollut noin 160 000 €, josta vuoden 2022 osuus on 70 000 €. Ilman energiakriisiä ja sen vaikutuksia säästöt olisivat siis olleet huomattavasti pienemmät. Lisäksi tarkastelussa olevien viiden vuoden aikana akusto olisi käynyt läpi yli tuhat sykliä, joka tarkoittaa, että akuston arvo olisi laskenut noin 65 000 €. Nettosäästöä neljän vuoden aikana olisi siis syntynyt noin 95 000 €. Todellisuudessa kulutuksen siirtoa voidaan tehdä useampia kertoja päivässä tai myös vuorokausien välillä, mutta esimerkki havainnollistaa spot-optimoinnin rajoituksia. Akkuteknologian hankintahinnan lasku voi tulevaisuudessa madaltaa syklin tuottovaadetta, mutta degradaatio tulee kehityskulusta huolimatta olemaan suurin rajoittava tekijä spot-optimoinnissa.

Spot-optimoinnin lisäksi akustolla voidaan myös pienentää kiinteistön sähkölaskua huipputehoa leikkaamalla. Monilla sähköyhtiöillä on suurille liittymille käytössä tehomaksu, jota maksetaan kuukausittain suurimman tehopiikin mukaan. Akustoon varastoitunutta energiaa voidaan käyttää kulutushuipun aikaan, jolloin myös huipputeho tasaantuu. (Linja-Aho et al. 2024, 10–11) Tehonleikkaamisen hyödyt riippuvat suuresti kiinteistöjen kulutusprofiilista. Jos kulutusprofiilissa ei esiinny selkeitä ja jyrkkiä tehopiikkejä, akuston avulla saavutettava hyöty jakaantuu useampiin pienempiin kulutushuippuihin. Tällöin yksittäisen piikin leikkaamisesta saatava säästö on pienempi, ja kokonaishyöty muodostuu useiden pienten tasausten

summana. Tehonleikkauksen kannattavuus perustuu siis siihen, kuinka epätasainen ja piikkimäinen kulutusprofiili on. Mitä suurempia ja harvempia tehopiikit ovat, sitä selkeämmin akusto pystyy niihin vaikuttamaan.

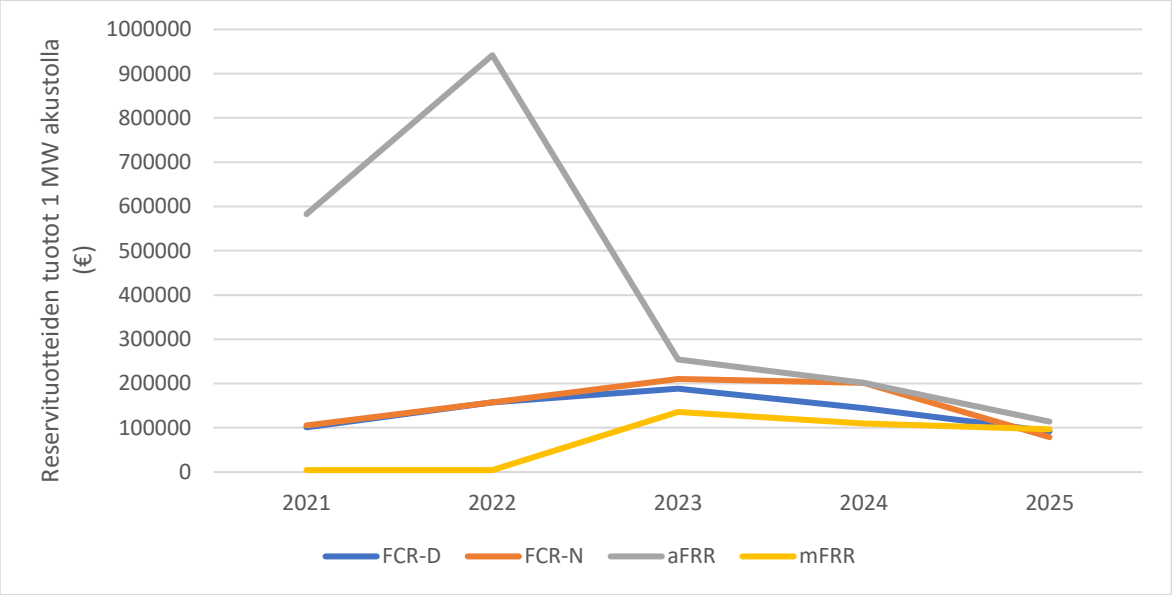
Case-kiinteistössä esiintyy kuukausittain muutama kulutuspiikki, jotka nostavat huipputehoa jopa 100 kW. Case-kiinteistön siirtoyhtiön ollessa Helen, 100 kW tehonleikkaus aiheuttaisi kuukaudessa noin 400 € säästön tehomaksussa. Case-kiinteistön tehotietoja ja tehomaksun hinnan muodostumista on esitelty tarkemmin liitteessä 1. Vuodessa tehon leikkaus toisi siis säästöä parhaimmillaan noin 4 800 €, mutta realistisesti kulutuspiikkien ennustaminen ja oikea-aikainen leikkaaminen voi olla haastavaa, jolloin säästöt jäävät vielä pienemmiksi. Tehonhallinnalla voi tästä huolimatta olla myös välillisiä hyötyjä, sillä huipputehon rajoittaminen voi joissain tapauksissa mahdollistaa taloteknisten laitteiden ja sähkönjakelukomponenttien mitoittamisen pienemmiksi tai ylimitoituksen välttämisen.

Spot-markkinoiden lisäksi akustoa voidaan kuitenkin hyödyntää myös muilla sähkömarkkinoilla, kuten reservimarkkinoilla. Litiumioniteknologian lyhyen vasteajan ansiosta, akustolla on mahdollista osallistua myös kaikkein nopeimmalle reservimarkkinalle, eli FFR-markkinalle. Toisin kuin spot-optimoinnissa, reservimarkkinoilla akku saa tuottoa pelkästään valmiudesta, eikä merkittävää energiavirtaa välttämättä synny. Näin ollen reservimarkkinoilta on saatavissa tuloja ilman, että akusto kuluu ollenkaan, sillä tietyillä reservituotteilla varsinaisia aktivointeja voi tulla vain harvoin. FFR ja molemmat FCR-D tuotteet ovat erimerkkejä reservituotteista, jotka aktivoituvat harvoin ja aktivoinnit ovat hyvin lyhytkestoisia. Esimerkiksi vuonna 2024 taajuus pysyi normaalialueella 97,99 % ajasta (Fingrid 2025b, 38), joten FCR-D tuotteita on aktivoitu keskimäärin vain 29 minuuttia vuorokaudessa. Vastaavasti vuoden 2024 aikana taajuus laski FFR tuotteen aktivointirajan alle vain kerran, ja poikkeama kesti alle yhden sekunnin (Fingrid 2025b, 58).

FCR-N reservituote säätää taajuutta jatkuvasti välillä 49,9–50,1 Hz. Tällä tuotteella akusto siis jatkuvasti säätää tehoa taajuuden perusteella, jolloin myös energiavirtaa on jatkuvasti. Taajuuden muuttuessa tasaisesti molempiin suuntiin, akuston varaustaso kuitenkin pysyy pitkälti paikallaan. Akuston kulumisen kannalta tämä on hyvä asia, sillä matala lataussyvyys pidentää akuston käyttöikää (Linja-Aho et al. 2024, 41). aFRR sekä mFRR tuotteissa aktivoinnit puolestaan voivat olla hyvin pitkäkestoisia, jolloin myös energiavirrat ovat suurempia. Tämä tarkoittaa, että myös varaustason hallinta on vaikeampaa FCR-tuotteisiin verrattuna. Akusto voi purkautua tai latautua pitkään samaan suuntaan aktivointien vuoksi, jolloin

sen varaustaso voi ajautua ääripäähän. Tämän estämiseksi akuston ohjauksessa tulee käyttää varaustason hallintaa, jotta varaustasoa voidaan tasapainottaa ostamalla sähköä aktivointien välissä.

Kuvassa 16 on esitetty 1 MW tehoisella akustolla saatavat tuotot vuosittain siten, että puolet kapasiteetista on tarjottu ylössäätöön ja puolet alassäätöön. FCR-N tuotteen tapauksessa tämä tarkoittaa, että on tarjottu 500 kW symmetristä säätöä. FFR tuote on jätetty laskuista pois, sillä tuotetta ei hankita jokaiselle tunnille, joka laskee vuosituottoa merkittävästi. Kuvaajasta on nähtävissä, miten aFRR markkina on ollut erityisen tuottoisa vuosina 2021 ja 2022, joka selittyy pääosin energiakriisin aiheuttamalla hintavaihtelun kasvulla ja korkeilla sähkön markkinahinnoilla. Samaan aikaan myös tuulivoiman kasvu oli voimakasta, eikä joustoresursseista ollut tarpeeksi tarjontaa. Vuodesta 2023 eteenpäin tilanne on tasoittunut, sillä reservitarjonta on lisääntynyt ja markkinat ovat tasaantuneet.



Kuva 16: Reservituotteiden teoreettiset tuotot 1 MW akustolla (Fingrid 2025c)

Muiden reservituotteiden hintatasot ovat olleet nousussa vuoteen 2023 asti, mutta vuodesta 2024 alkaen kaikkien reservituotteiden hintatasossa on nähtävissä laskua. Vuonna 2025 FCR-N markkinan hintataso oli jopa puolet pienempi edellisvuoteen verrattuna. FCR-N on tyypillisin reservituote, jolle sähkövarastot osallistuvat, joten hintatason lasku on seurausta kasvaneista akkuvarastoinvestoinneista. Muissa reservituotteissa hintatason lasku on huomattavasti maltillisempaa, mutta trendi on selvästi alaspäin tarjonnan kasvaessa.

Reservimarkkinoiden tuottoa voidaan optimoida ennustamalla eri reservituotteiden hintatasoja ja tarjoamalla kapasiteettia aina sille markkinalle, jossa saatava korvaus on suurin. Akuston kykyä osallistua monille markkinoille voidaan hyödyntää, ja kapasiteettia voidaan ohjata dynaamisesti markkinaolosuhteiden mukaan. Ensimmäinen tapa hyödyntää reservituotteiden optimointia on Fingridin mahdollistama yhteistarjous, jossa voidaan jättää FCR-N tai FCR-D ylös -tarjouksen lisäksi tarjous myös FFR markkinalle. Näin ollen, jos FFR-tuotteen hinta nousee muita korkeammaksi, järjestelmä hyväksyy tarjouksen automaattisesti FFR-markkinalle ilman erillistä manuaalista optimointia.

Toinen tapa on hyödyntää ennustepohjaista optimointia, jossa tulevien päivien reservihintoja arvioidaan historiallisten Fingridin hintatietojen, spot-markkinan hintasignaalien sekä sähkönkulutuksen ja -tuotannon ennusteiden perusteella. Ennustemallien avulla akuston kapasiteetti voidaan kohdentaa etukäteen sille reservituotteelle, jonka odotetaan tuottavan parhaan taloudellisen tuloksen. Tällaisia optimointijärjestelmiä on itse luomisen lisäksi saatavilla markkinoilta ulkoistettuna palveluna, jossa kolmas osapuoli optimoi ja operoi akuston käyttöä.

Tasevastaavat voivat hyödyntää akustoa myös oman taseensa tasapainottamiseen. Aktiivinen tasehallinta perustuu kulutus- ja tuotantoennusteiden jatkuvaan päivittämiseen, päivän sisäisten markkinoiden hyödyntämiseen sekä joustavien resurssien käyttöön ennustepoikkeamien korjaamisessa. Tasehallinnan taloudellinen hyöty perustuu siis vältettyihin kustannuksiin ja pienempään altistumiseen epäsuotuisille tasehinnoille. Senaatti-kiinteistöjen sähkönhankinnan toimintamallin muuttuessa tasehallinnan vastuu on joka tapauksessa siirtymässä organisaation omalle vastuulle, minkä vuoksi akuston potentiaalinen rooli taseen tasaamisessa tulee tunnistaa jo investointivaiheessa. Tasehallinnan säästöjä on kuitenkin vaikea arvioida luotettavasti etukäteen, sillä ne riippuvat merkittävästi lähtötilanteesta, hankinnan rakenteesta sekä tasesähkön hintavaihtelusta.

Yhteenvetona akuston hyödyntäminen yksittäisillä markkinoilla on taloudellisesti rajallista. Tehonhallinnan hyödyt ovat nykyisessä markkinaympäristössä vähäisiä, spot-markkinoilla akuston kannattavuus riippuu voimakkaasti hintatasosta ja hintavaihtelusta, ja pitkäaikaista käyttöä rajoittaa akuston degradaatio. Reservimarkkinat tarjoavat tasaisempaa ja ennustettavampaa tulovirtaa, mutta hintatason lasku heikentää niiden pitkän aikavälin tuottopotentiaalia. Tasehallinnan kannattavuus puolestaan riippuu merkittävästi lähtötilanteesta ja olemassa olevista taseenhallinnan käytännöistä, mutta nykyisillä ja ajoittain voimakkaasti

vaihtelevilla tasesähkön hinnoilla akuston hyödyntäminen tasehallinnassa voi tuottaa huomattavia kustannussäästöjä. Paras taloudellinen hyöty akustosta saadaankin optimoimalla akuston käyttöä tunnilta tunnille kaikkien mahdollisten markkinoiden kesken.

3.2 Hybridilämmitys

Hybridilämmityksellä tarkoitetaan lämmitysjärjestelmää, jossa käytetään kahta tai useampaa lämpöenergian lähdettä. Kaukolämpö on yleisin lämmitysmuoto Suomessa, ja on myös tämän tutkimuksen case-kiinteistön ensisijainen lämmönlähde. Toissijainen lämmönlähde voi olla esimerkiksi sähkö, hake tai öljy, mutta tässä työssä hybridilämmitys toteutetaan ilmavesilämpöpumpulla. Hybridilämmitys mahdollistaa kiinteistön lämmöntuotannon optimoinnin jokaiselle hetkelle esimerkiksi kustannusten tai päästöjen mukaan. Käytännössä tämä tarkoittaa, että lämpöpumput tuottavat lämpöä silloin, kun sähkön hinta on alhainen, ja kaukolämpöä hyödynnetään silloin, kun se on sähköä edullisempaa.

Hybridilämmitys kaukolämpöverkon ja hajautettujen lämpöpumppujen yhdistelmällä on todettu olevan kustannustehokas tapa vähentää hiilidioksidipäästöjä jo vuonna 2010 (Molyneaux, Leyland & Favrat 2010) Myöhemmät tutkimukset muun muassa Ruotsista ovat osoittaneet, että kaukolämmön ja lämpöpumpun yhteiskäytöllä voidaan vähentää energian kokonaiskustannuksia 33 % ja päästöjä jopa 75 % pelkkään kaukolämpöön verrattuna. Hyödyt perustuvat eri lämmönlähteiden marginaalikustannusten optimointiin, eli lämpöpumppuja hyödynnetään silloin, kun sähkön hinta ja päästöintensiteetti ovat alhaisia, ja kaukolämpöä silloin, kun sen tuotantokustannus on pienempi. (Lygnerud et al. 2021) Kaukolämmön tuotantorakenteiden muutokset vuoden 2021 jälkeen voivat kuitenkin vaikuttaa tulosten sovellettavuuteen nykytilanteessa. Nykyisin hybridijärjestelmien kannattavuutta lisää kuitenkin myös mahdollisuus osallistua sähkömarkkinoiden reservipalveluihin.

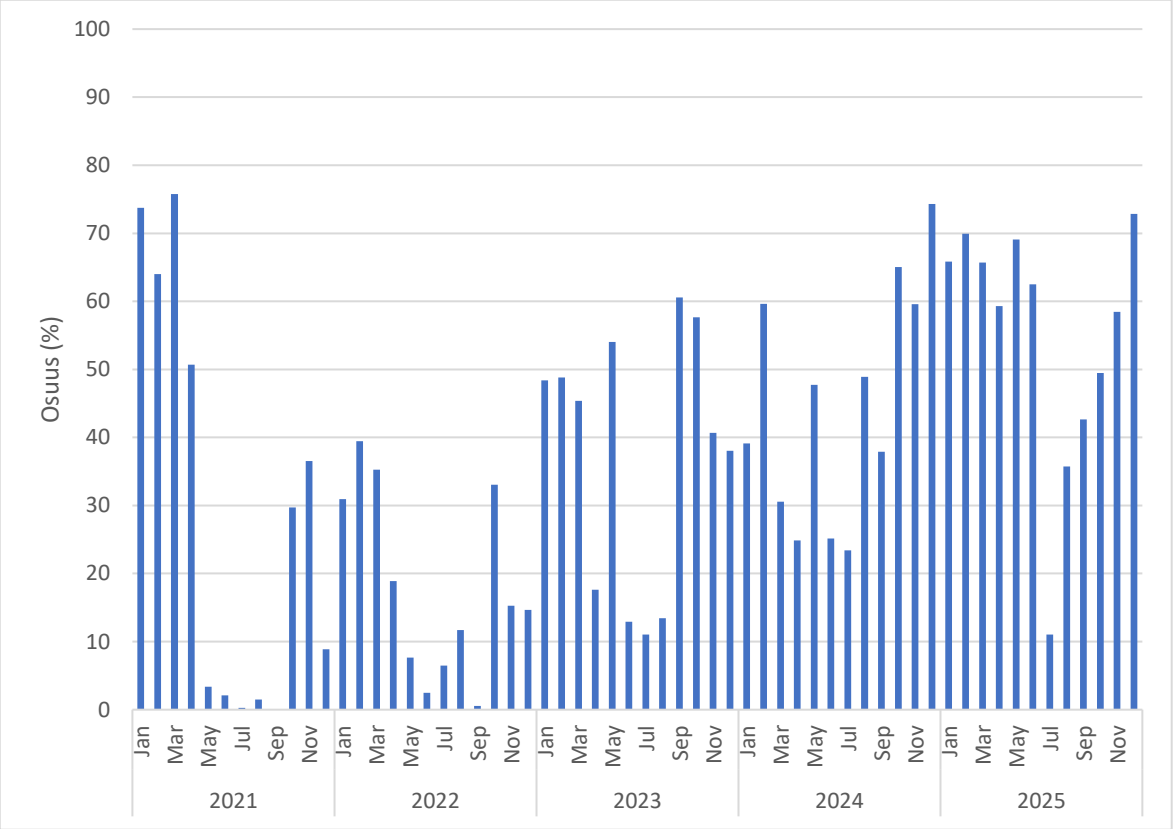
Hybridilämmityksen sähkötehoa voidaan tarjota reservimarkkinoille sekä ylös- että alassäätöön. Kaukolämpöverkon ansiosta lämmön lähdettä voidaan vaihtaa reservimarkkinoiden tarpeiden mukaisesti ilman, että kiinteistön sisäolosuhteet muuttuvat. Kaukolämpöverkko voi siis toimia ikään kuin suurena lämpövarastona. Ylössäätötilanteessa lämpöpumppujen käyttöä voidaan vähentää ja korvata lämpö kaukolämmöllä, kun taas alassäätötilanteessa lämpöpumppuja voidaan käyttää enemmän ja vähentää kaukolämmön kulutusta. Näin

hybridijärjestelmä pystyy tuottamaan nopeasti reagoivaa joustoa sähkömarkkinoille ja luomaan kiinteistölle uutta tulopotentiaalia.

Tässä tutkimuksessa tutkitaan ilmalämpöpumppuihin perustuvaa kiinteistön ulkopuolelle asennettavaa konttiratkaisua, joka tuottaa lämpöä kiinteistön nykyiseen lämmönjakoverkkoon. Ulkopuolelle asennettuna kiinteistön tiloja ei tarvitse käyttää lämpöpumpuille, jonka lisäksi pumput ovat siirrettävissä myös muihin kohteisiin. Siirrettävissä oleva kontti tuo myös hyötyjä kriisinsietokykyyn, jota käsitellään tarkemmin työn myöhemmässä luvussa.

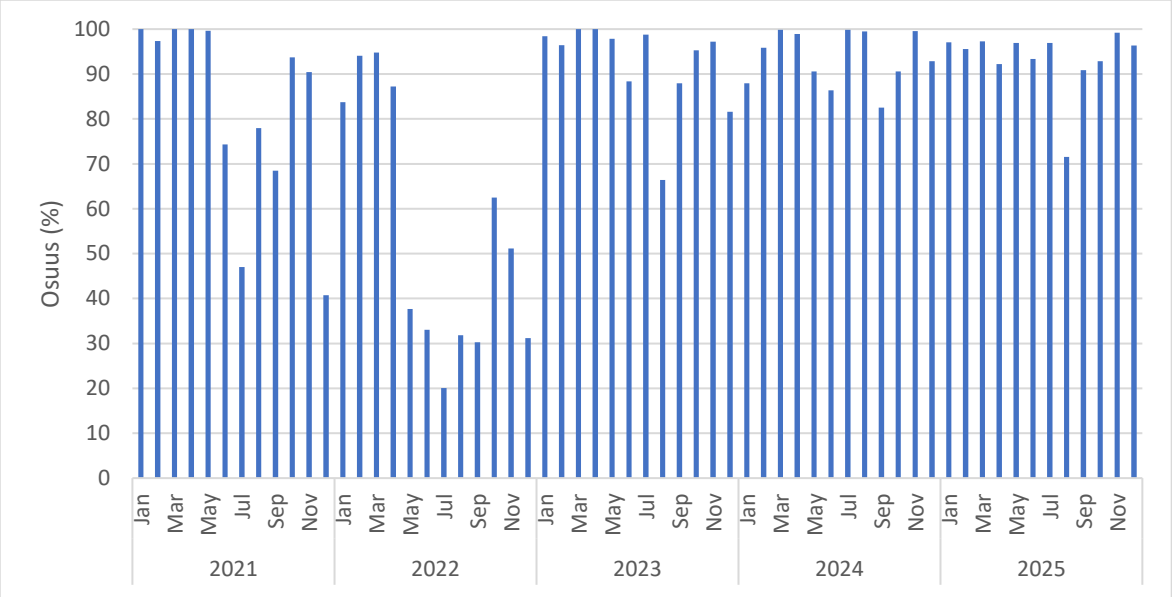
Laskennassa käytetään hybridilämmityskonttia, joka sisältää lämpöteholtaan 400 kW lämpöpumput sekä 250 kW sähkökattilan. Tässä työssä tarkastellaan vain lämmön osittaista korvaamista, mutta ilmalämpöpumpuilla on mahdollista tuottaa myös kylmäenergiaa tietyin teknisin muutoksin. Näiden lisäksi konttiin voidaan integroida myös muita lämmönlähteitä kuten maalämpökaivoja, aurinkolämpöpaneeleja tai esimerkiksi varavoimageneraattorin lämmön talteenottoa. Lisälähteet ja niiden kannattavuus tulee kuitenkin tarkastella tapauskohtaisesti, jonka takia tässä työssä keskitytään vain perusskenaarion tarkasteluun.

Kuvassa 17 on esitetty kuukausittain osuus niistä tunneista, jolloin pörssisähkö on ollut kyseisen kuukauden kaukolämmön hintaa halvempi. Kaukolämmön kuukausihinnat on esitelty liitteessä 1. Pörssisähkön hintaan on lisätty myös sähkön hankintakustannukset eli marginaali, sähkövero sekä -siirto. Siirtohinta on laskettu Helenin keskijännitesiirron hinnastosta talvisiirron sekä muun ajan siirron mukaan. Myös siirtohinnat sekä niiden aikaperusteet on esitelty tarkemmin liitteessä 1. Kuvasta on nähtävissä, miten sähkön hinta on varsinkin talvisin kaukolämpöä halvempaa jopa yli puolet ajasta, mutta myös kesäisin sähkö on usein kaukolämpöä halvempaa. Huomionarvoista on myös, että jopa energiakriisin aikana vuosina 2022 ja 2023 on monia tunteja, jolloin sähkö on ollut halvempaa. Yleinen hintataso on kuitenkin ollut selvässä laskussa energiakriisin jälkeen, joka näkyy myös sähkön kasvavassa osuudessa.



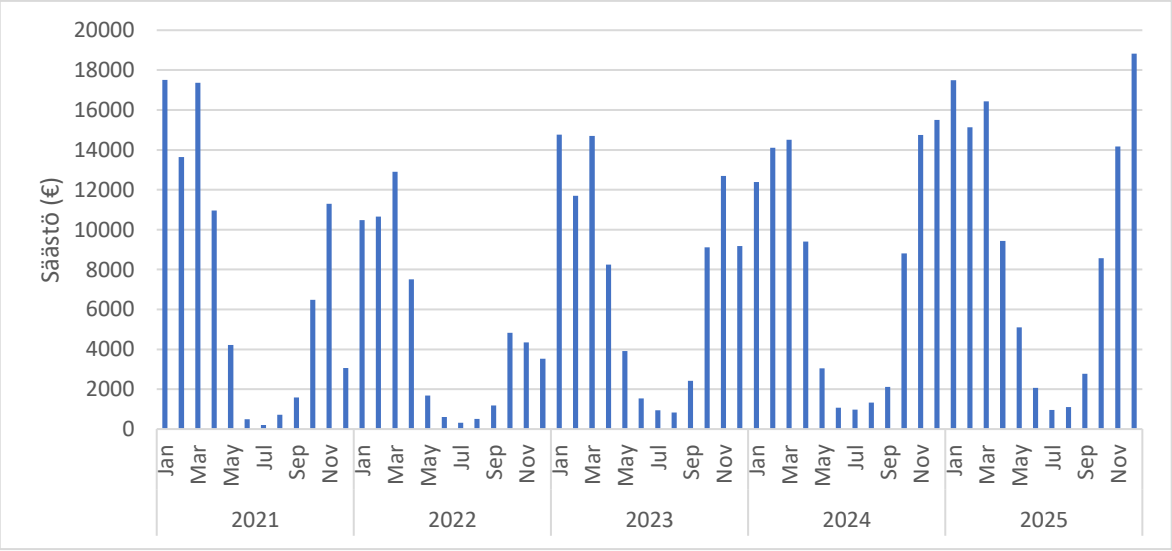
Kuva 17: Osuus ajasta, kun sähkö on kaukolämpöä halvempaa

Kun otetaan huomioon myös lämpöpumpun energiatehokkuus, eli COP-arvo, hybridilämmityksen hyödyntäminen kannattaa vielä useammalla tunnilla. COP-arvolla tarkoitetaan sitä kerrointa, jonka verran lämpöpumppu tuottaa lämpöenergiaa kuluttamaansa sähköenergiaa kohden (Rauf 2023, 242–243). Lämpöpumpun COP-arvo riippuu erityisesti ulkolämpötilasta, joten tässä laskennassa on oletettu talvikuukausilta arvoa 2, ja muilta kuukausilta arvoa 3. Todellisuudessa arvot voivat olla jopa näitä korkeampia, mutta nämä tarjoavat hyvän pohjan laskennalle. Kuvassa 18 on esitetty kuukausittain osuudet ajasta, jolloin lämpöpumppujen ajaminen on kannattavaa, kun myös COP-arvo huomioidaan. Kuvaajasta on nähtävissä, miten lämpöpumppujen käyttäminen on ollut energiakriisiä lukuun ottamatta kannattavaa lähes koko ajan.



Kuva 18: Osuus ajasta, kun lämpöpumpun käyttäminen on kannattavaa

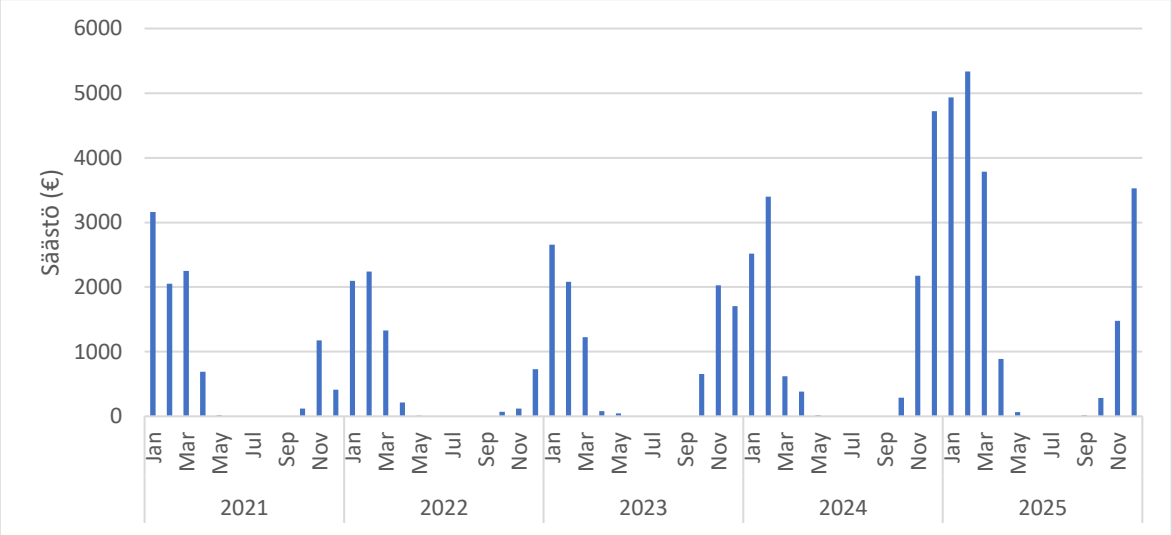
Kuvassa 19 on esitetty kuukausittainen säästöpotentiaali 400 kW tehoisella lämpöpumpulla, kun sitä olisi ajettu sähkön hintojen mukaan. Laskentaan on huomioitu myös case-kiinteistön lämmöntarve, eli kesäisin lämpöpumppua olisi ajettu vain kyseisen hetken lämmöntarpeen mukaan. Kuvasta on nähtävissä, että vaikka lämpöpumppua lähtökohtaisesti on kannattavaa ajaa myös kesäkuukausina, säästöpotentiaali jää pieneksi alhaisemman kaukolämmön hinnan sekä lämmön tarpeen takia.



Kuva 19: Kuukausittainen säästö 400 kW lämpöpumpulla

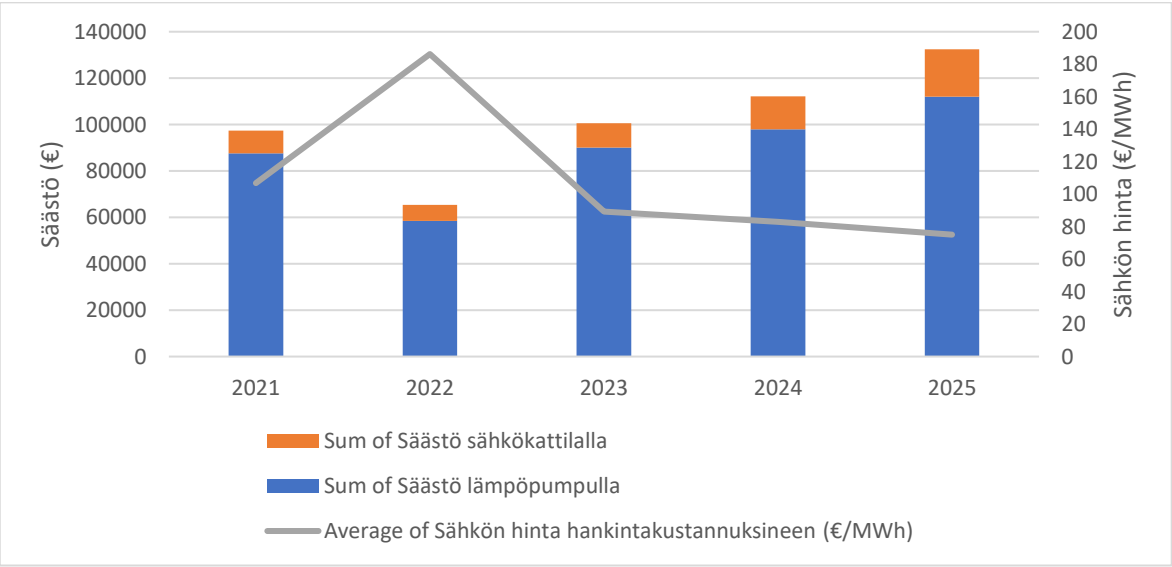
Hybridilämmitysvoimalan ajotavan optimoimiseksi, myös sähkökattilaa voidaan käyttää lämmön tuottamiseen silloin, kun se on kannattavaa. Kuvassa 20 on laskettu kuukausittaiset

säästöt 250 kW tehoisen sähkökattilan käytöstä. Sähkökattilan energiatehokkuudeksi on oletettu tasan 1, eli kattila on käynnistetty heti, kun sähkö on ollut kaukolämpöä halvempaa ja kaikki lämpö saadaan hyödynnettyä. Kuvaajasta on nähtävissä, miten heikommasta energiatehokkuudesta huolimatta, myös sähkökattilan käyttäminen lämmön tuottamiseen on talvisin usein kannattavaa. Sähkökattilan vuosittaiset lisäsäästöt ovat noin 10 000 €



Kuva 20: Lisäsäästöt sähkökattilan käytöstä

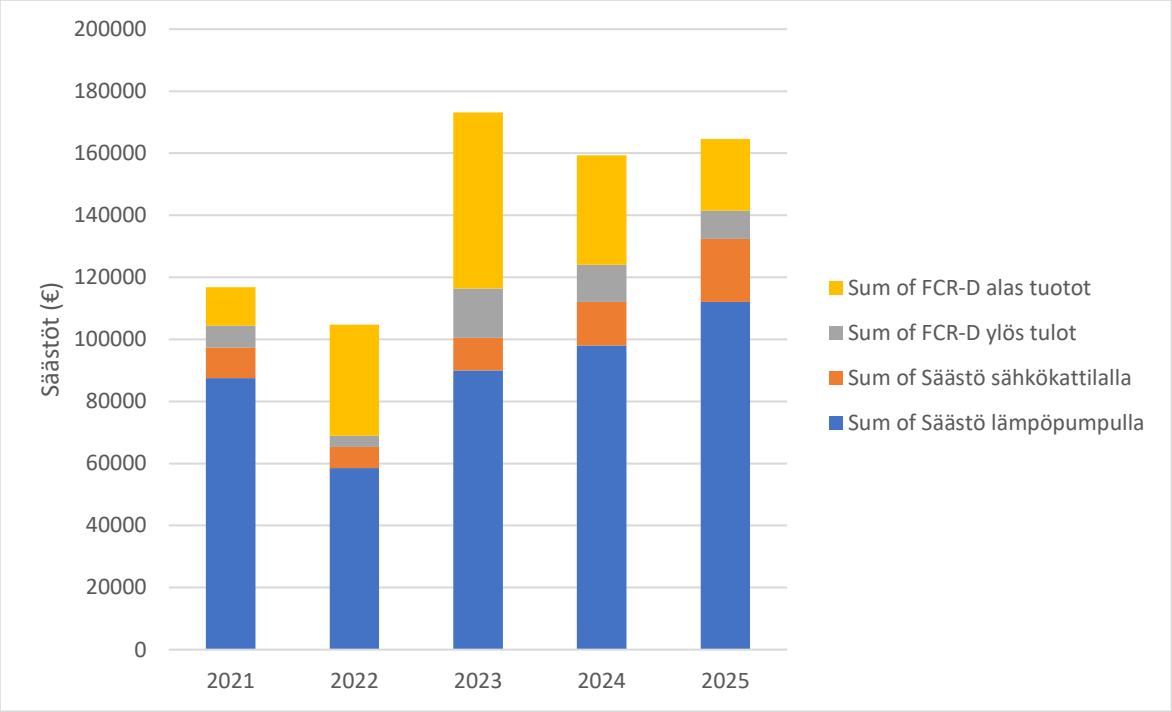
Kuvassa 21 on esitetty hybridilämmityksen vuosittaiset säästöt yhteensä, kun voimalaa olisi käytetty sähkön hinnan sekä kiinteistön lämmöntarpeen mukaan. Hybridivoimalan vuosituotot ovat noin 100 000 € luokkaa, mutta energiakriisin aikaiset korkeat sähkön hinnat aiheuttavat pienen poikkeuksen, ja vuonna 2022 säästöt olisivat jääneet noin 65 000 € tasolle.



Kuva 21: Hybridivoimalan vuosittaiset säästöt yhteensä

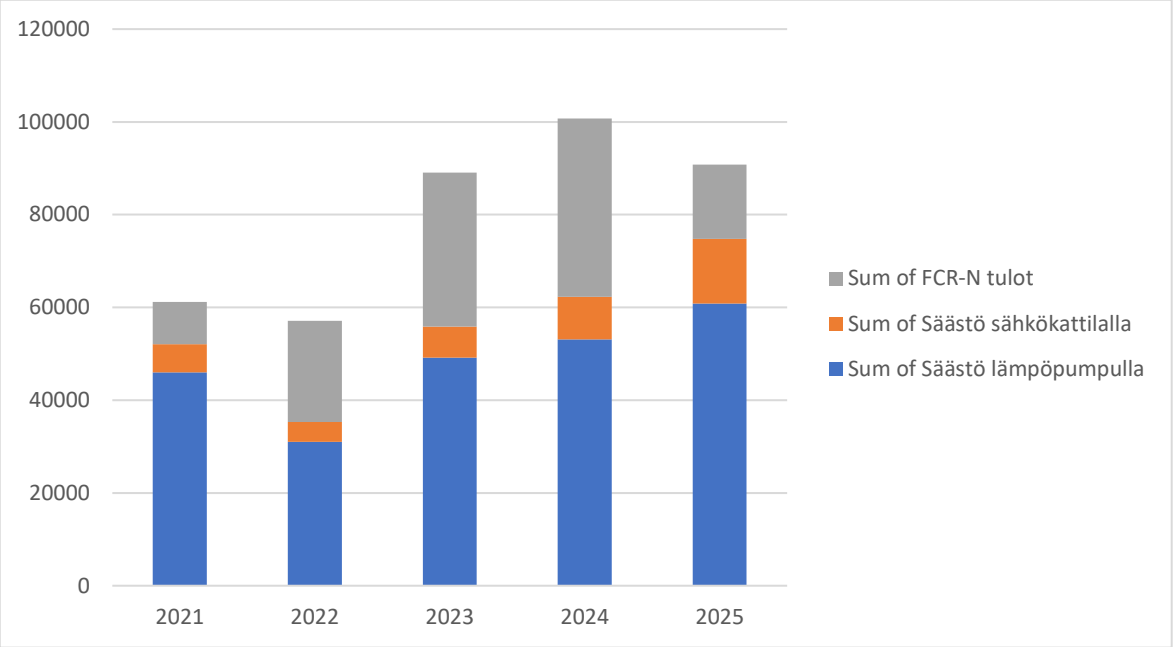
Lisätuloa ilmapumppuratkaisulle on saatavilla reservimarkkinoilta, ja hybridilämmitysjärjestelmän ajotapaan reservimarkkinoilla on erilaisia strategioita. Näistä selkein on tarjota kapasiteettia FCR-D tuotteelle sen mukaan, miten ilmalämpöpumppuja ajetaan spot-markkinoiden mukaisesti. Mallissa lämpöpumput tarjottaisiin ylössäätöön niillä tunneilla, kun pumppuja on spot-markkinoiden mukaisesti järkevä ajaa. Vastaavasti lämpöpumput voidaan tarjota alassäätöön niillä tunneilla, kun pörssisähkö on kallista, eikä pumppuja muuten ajettaisi. Tämä tapa on myös teknisestä näkökulmasta helppo toteuttaa, sillä pörssisähkön hinnat julkistetaan klo 14 (Nord Pool n.d.b), ja FCR-D markkinalle voidaan tehdä tarjouksia vielä klo 18.30 asti (Fingrid 2024f). Näin ollen tarjoukset on mahdollista luoda pörssisähkön ja kaukolämmön välisen hintaeron mukaan.

Kuvasta 22 on nähtävissä, että tarjoamalla hybridivoimalan sähkötehoa FCR-D markkinoille, voidaan lisätä hybridivoimalan tuottoja merkittävästi. Vuonna 2023 FCR-D markkinat olisivat lähes kaksinkertaistaneet hybridivoimalasta saatavat säästöt. Kuvaajasta on kuitenkin nähtävissä, että FCR-D markkinoista saatavat tulot ovat laskussa, jota selittää erityisesti FCR-D tuotteiden alentunut keskihinta. Säästöt kaukolämmön vähentämisestä kuitenkin ovat kasvaneet viimeisen kahden vuoden aikana, ja kompensoivat heikentynyttä reservimarkkinoiden tulotasoa. Laskelmassa on oletettu, että alassäädön aktivoinnin tapahtuessa myös kesällä lämpövoimalaa voitaisiin ajaa täydellä teholla. FCR-D aktivoinnit ovat lyhytkestoisia, joten lämmön määrän on oletettu mahtuvan lämminvesivaraajaan.



Kuva 22: Hybridilämmityskontin kokonaistuotot FCR-D markkinalla

Toinen yksinkertainen ajotapa on ajaa hybridilämpövoimalaa tarpeeseen nähden puoliteholla, jolloin säätökykyä voidaan tarjota symmetrisille FCR-N markkinoille. Tämä tarkoittaa, että lämmöntarpeen ollessa 400 kW, lämpöpumpuilla tuotetaan vain 200 kW lämpöä. FCR-N markkinalle tarjottava sähköteho on siis tässä esimerkissä 100 kW, COP-arvon ollessa 2. Kuvassa 23 on esitetty tällä ajotavalla syntyvät säästöt. Kuvaajasta on nähtävissä, että FCR-N taajuustuenta ei riitä kattamaan menetettyä säästöä kaukolämmön korvaamisesta sähkölämmityksellä. FCR-D taajuustuenta on siis vuositasolla kannattavampaa, erityisesti koska se ei vähennä kaukolämmön korvaamisesta saatua säästöä. Hintatasot voivat kuitenkin muuttua tulevaisuudessa, joten on tärkeää ylläpitää valmiuksia mahdollisimman monelle reservimarkkinalle.



Kuva 23: Hybridilämmityskontin kokonaistuotot FCR-N markkinalla

Samoin kuin sähköakuston kohdalla, myös hybridilämmitysvoimalalla on saavutettavissa lisähyötyä optimoimalla ajotapoja reservituotteiden hintavaihtelun mukaan. Tällöin voidaan tarjota lämmityksen joustoa aina sille markkinalle, josta on mahdollista saada suurin korvaus. Pelkkien FCR markkinoiden lisäksi näihin lukeutuvat myös aFRR ja mFRR markkinat, mutta FFR markkinalle hybridilämmitys ei voi osallistua liian pitkän vasteajan takia. Reservituotteiden optimointi edellyttää kuitenkin hyvää ennustealgoritmia, joka kykenee ennustamaan reservituotteiden hintatasot ja jättämään tarjoukset niiden mukaan.

Virtuaalivoimalan sähköakusto tuo joustoa myös hybridilämmityksen hyödyntämiseen, sillä sähkövaraston sekä lämpöpumpun taloudellisten yhteisvaikutuksen on tutkittu olevan suurempia kuin yksittäiset hyödyt yhteensä. Synergiaedut perustuvat siihen, että sähkövarasto mahdollistaa lämpöpumpun tarkan ajoituksen spot-markkinoilla ja tuo järjestelmään lisää nopeasti säädettävää tehoa reservimarkkinoita varten. Samalla reservimarkkinoille voidaan tarjota suurempi kapasiteetti, koska reservitarjouksia ei tarvitse varmistaa yhtä suurella hätävaralla kuin tilanteessa, jossa laitteita tarjottaisiin erillisinä. (Savolainen, Einolander & Lahdelma 2024)

3.3 Älykäs energian ohjaus

Virtuaalivoimalan keskiössä toimii älykäs ohjausalgoritmi, joka optimoi kiinteistön energiankäyttöä ja osallistumista sähkömarkkinoiden kysyntäjoustoon. Kiinteistöakuston sekä hybridilämmitysvoimalan lisäksi järjestelmään voidaan yhdistää myös kiinteistössä jo olevaa joustavaa talotekniikkaa, kuten ilmanvaihto, pumput ja valaistus. Älykäs energianohjausjärjestelmä liitetään jo olemassa olevan rakennusautomaatiojärjestelmän rinnalle tai tilalle, jolloin älykäs ohjausjärjestelmä lähettää säätösignaalit rakennusautomaatiojärjestelmälle ja talotekniikalle.

Älykkään energianohjausjärjestelmä perustuu kolmeen kerrokseen, jossa ennakoiva optimointi, reaaliaikainen ohjaus ja laitekohtainen säätö toimivat yhtenä kokonaisuutena. Ylimmällä tasolla toimii ennustemalli, joka hyödyntää sääennusteita, kulutusprofiileja, käyttöasteita ja markkinahintoja optimoidakseen seuraavien minuuttien ja tuntien toimintaa. Keskimmäisessä portaassa reaaliaikainen ohjaus priorisoi joustotoimet markkinatilanteen ja sisäolosuhteiden rajoitteiden mukaan. Alimmalla tasolla järjestelmä lähettää ohjauskomennot rakennusautomaatiojärjestelmälle, joka toteuttaa muutokset laitekohtaisesti.

Pelkällä mittareiden lisäämisellä sekä älykkään ohjauksen lisäämisellä voidaan tuottaa rahallisia hyötyjä. Useissa rakennuksissa esiintyy ylilämmitystä, epätarkkoja asetusarvoja tai tarpeettoman korkeita ilmavirtoja, joita ei havaita ilman dataohjattua analytiikkaa. Älykkään optimointialgoritmin avulla voidaan tunnistaa tämän tyyppiset poikkeamat ja palauttaa olosuhteet lähemmäs todellista tarvetta, mikä pienentää energiankulutusta ja voi jopa parantaa sisäolosuhteita. Li et al. (2024) tutkimuksen mukaan tällainen reaaliaikainen energianohjaus voi vähentää energiankulutusta jopa 10 %.

Myös sääennusteen huomioimalla voidaan parantaa ilmanvaihtojärjestelmien toimintaa. Perinteisesti rakennusautomaatiojärjestelmä reagoi muutoksiin sisäilmassa reaktiivisesti eli viiveellä. Sääennusteen ja tyypilliset käyttöasteet huomioimalla järjestelmä voi reagoida muutoksiin proaktiivisesti, jolloin ylikorjauksen riski vähentyy, energiaa kuluu vähemmän ja sisäolosuhteet pysyvät lähempänä oletusarvoa. (Hou et al. 2022; Yao & Shekhar 2021) Virheelliset sääennusteet voivat kuitenkin tutkimusten mukaan kuitenkin jopa lisätä sisäolosuhteiden poikkeamia, jos järjestelmä säätää lämpötilaa väärään suuntaan virheellisen ennusteen takia (Yao & Shekhar 2021).

Ohjausalgoritmilla voidaan myös luoda kiinteistöstä virtuaalinen lämpövarasto. Ohjausjärjestelmän periaate on määrittää kiinteistölle halutut sisäolosuhteet, joiden sisällä ohjausjärjestelmä säätelee taloteknisiä laitteita taloudellisten hyötyjen mukaisesti. Kiinteistöä voidaan näin verrata lämpövarastoon, jonka kapasiteetti on sisäolosuhteiden parametrien välinen lämpöenergia. Lämmityskaudella lämpövarastoa voidaan pitää täyteen ladattuna, kun sisälämpötila on maksimiarvossaan ja tyhjänä, kun lämpötila on minimiarvossa. Jäähdytyskaudella arvot ovat toisin päin.

Gong et al. (2022) esittävät tutkimuksessa, kuinka suurten asuinalueiden ilmanvaihtojärjestelmiä voidaan hyödyntää virtuaalisena energiavarastona ja ohjata kysyntäjoustossa. Rakennusten terminen käyttäytyminen mallinnettiin, ja kulutuksenjoustolla onnistuttiin vähentämään asuinalueen huipputehon tarvetta jopa 16 %. (Gong et al. 2022) Tehon leikkaantumisen lisäksi rahallista hyötyä voidaan saada myös kohdistamalla kulutusta sähkömarkkinoiden signaalien mukaisesti. Älykkäällä ohjauksella ja dynaamisella kysyntäjoustolla voidaan lisätä virtuaalivoimalan tuottoa ilman, että asiakastyytyväisyys kärsii. Tutkimuksen mukaan optimaalisella säätöstrategialla voidaan paitsi vähentää energiankulutuksen huippuja, myös parantaa resurssien käyttöä ja säilyttää mukavuustaso lähes ennallaan, vaikka kulutusta siirretään dynaamisesti sähkön hinnan ja verkon tarpeen mukaan. (Mei et al. 2023)

Ilmanvaihtojärjestelmien ohjaamiseen on kolme pääasiallista ohjausmenetelmää (Beil, Hiskens & Backhaus 2016):

- Puhaltimen nopeuden ohjaus: Nopein tapa vähentää sähkönkulutusta muuttamalla taajuusmuuttajan tai EC-moottorin kautta ilmanvaihtokoneen pyörimisnopeutta. Menetelmä mahdollistaa nopean vasteen, mutta saattaa edellyttää laitepäivityksiä.

- Ilmavirran tai paineen asetusarvon muutos: Epäsuora menetelmä, jossa puhaltimen kuormitusta muutetaan säätämällä haluttua ilmanpaine- tai virtausasetusta. Menetelmä voidaan toteuttaa ohjelmallisesti ilman laiteinvestointeja, mutta sen vasteaika on hieman hitaampi.

- Termostaattien asetusarvon muutos: Kaikkein hitain, mutta laajimmin sovellettavissa oleva menetelmä, jossa lämpötila-asetuksia voidaan muuttaa tilakohtaisesti. Tämä mahdollistaa jouston kohdistamisen vain valituille alueille ja takaa käyttäjämukavuuden säilymisen.

Näistä keinoista mikä tahansa soveltuu spot-markkinoilla säätöön sekä energiankulutuksen vähentämiseen, mutta vain puhaltimen nopeutta säätämällä saavutetaan tarpeeksi matala vasteaika reservimarkkinoilla toimimiseen. Laboratoriokokeissa ilmanvaihtokoneiden taajuussäätö on vastannut suorituskyvyltään sähköakkujen tasoa, kun tarkastellaan vasteherkkyyttä ja kykyä seurata ohjaussignaalia lyhyillä aikaväleillä (Cai & Braun 2019). Käytännön haasteita syntyy kuitenkin laitekohtaisista rajoitteista, ohjausviiveistä sekä sisäolosuhteiden ylläpitämiseen.

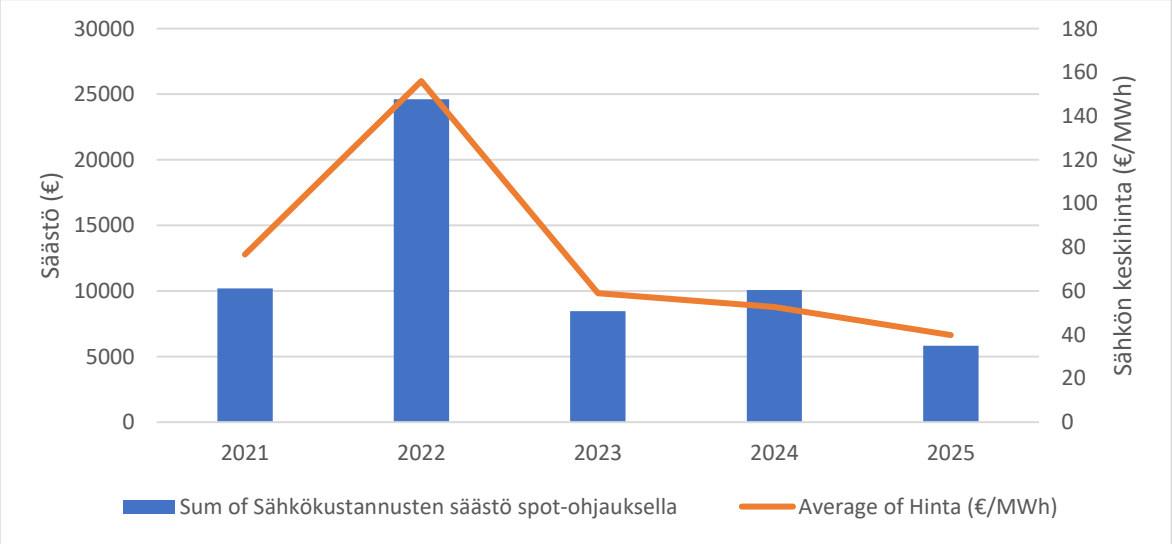
Käytännön toteutuksessa suurimmat haasteet liittyvät siihen, että ilmanvaihtokoneiden ohjausketju ei ole lähtökohtaisesti suunniteltu sekuntitason taajuusohjaukseen. Vaikka puhaltimien taajuusmuuttajat tai EC-moottorit voivat reagoida nopeasti, ohjausjärjestelmän muut viiveet hidastavat kokonaisvastetta. Viiveitä voi aiheuttaa muun muassa rakennusautomaatiojärjestelmä, ohjauskomentojen välittyminen sekä rajallinen laskentateho. Samalla on varmistettava, ettei nopea ja toistuva tehonsäätö aiheuta sisäolosuhteiden heikkenemistä, paine-erojen muutoksia tai lämpötilan ja hiilidioksiditason poikkeamia, jos taajuuden muutokset estävät ilmanvaihtokoneiden toimintaa. (Granitsas et al. 2025) Näiden rajoitteiden vuoksi ohjauksen suunnittelussa on huomioitava laitekohtainen dynamiikka, kommunikointiviiveet ja sisäilmaston pysyvyys, jotta taloteknisillä laitteilla voidaan tuottaa hyväksyttävää ja teknisesti luotettavaa taajuusreserviä.

Virtuaalivoimalan kokonaisuudessa näitä ongelmia voidaan lievittää kiinteistöakuston avulla, sillä se tarjoaa varatehoa, jos talotekniikka ei ole sisäolosuhteiden puitteissa kyvykäs joustoon. Lisäksi tulee huomioida, että FCR-D reservituotteella aktivointeja tulee hyvin harvoin, jolloin varsinaista muutosta talotekniikan ajotavalle ei synny. Aiempi tutkimus on myös todistanut taloteknisten järjestelmien jouston taloudellisesti kannattavaksi. Taloudellista hyötyä on saatavilla sekä spot-markkinoiden hintavaihtelusta sekä reservimarkkinoilta (Lopez & Bunn 2025; Yadav et al. 2024). Lopez & Bunn (2025) tutkimuksen mukaan sääolosuhteet vaikuttavat potentiaalisen jouston määrään ja sitä myötä myös joustopotentiaaliin. Suomessa tämä tarkoittaa, että talvikuukausina kiinteistön joustoa on siis saatavilla vähemmän.

Joustavan kulutuksen määrä on vuodenajasta riippumatta joka tapauksessa hyvin kiinteistösidonnaista ja tulee selvittää aina kohdekohtaisesti. Joustopotentiaalin määrään vaikuttaa luonnollisesti olemassa olevan talotekniikan määrä, mutta myös rakennuksen termodynaamiset ominaisuudet, eli kuinka nopeasti rakennus viilenee. Tässä työssä on oletettu case-

kiinteistön keskimääräiseksi joustopotentiaaliksi 100 kW, joka vastaa noin 20 % kiinteistön keskimääräisestä tehosta. Todellisuudessa joustopotentiaali vaihtelee sekä vuodenajan että päivän mukaan. Esimerkiksi öisin ja viikonloppuisin voidaan sallia sisäolosuhteille suurempi vaihteluväli, kun kiinteistössä ei ole käyttöä.

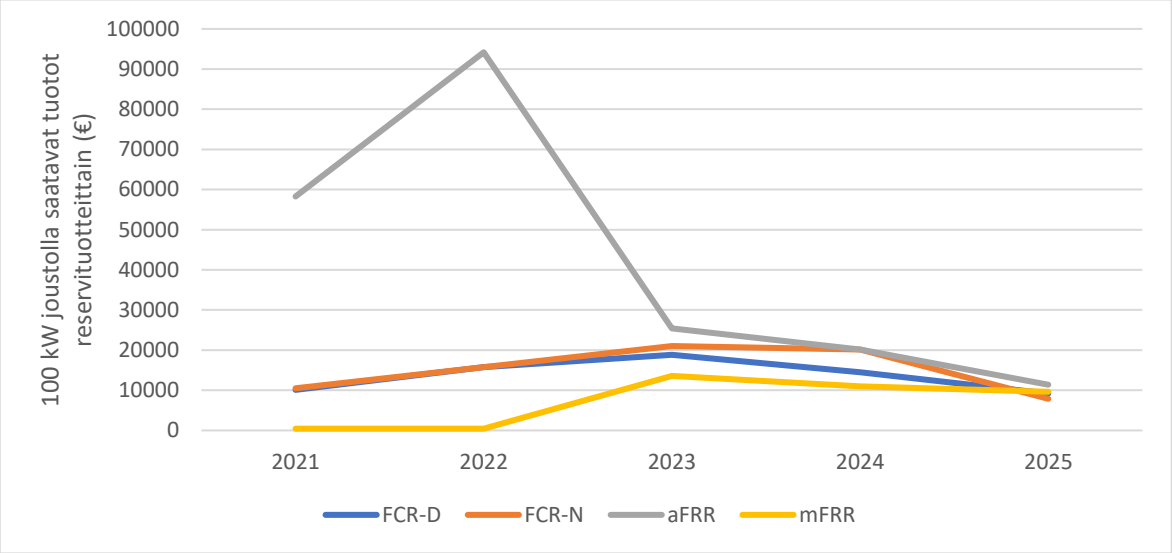
Kuvassa 24 on esitetty vuosittainen säästöpotentiaali, kun case-kiinteistössä olisi säädetty kulutusta 100 kW:n tuntien välillä aina kalliimmilta tunneilta halvimmille. Kuvaajasta on nähtävissä, miten kulutuksensiirron säästöpotentiaali on vuosittain noin 10 000 €. Vuosi 2022 osoittaa selvän poikkeuksen, ja säästö olisi ollut noin 25 000 €. Tämä osoittaa, että myös korkean hintatason aikana esiintyy hintojen vaihtelua, jota voidaan hyödyntää kulutuksen joustolla. Monimutkaisemmalla ja älykkäämmällä kulutuksenohjauksella olisi varmasti saavutettavissa suurempia rahallisia hyötyjä, mutta tämä kuvastaa hyvää perustasoa. Kulutuksenjousto tarjoaa lähtökohtaisesti vakaata säästöpotentiaalia eri markkinatilanteissa ja toimii hyvänä riskienhallintakeinona myös korkeamman sähkönhinnan varalta.



Kuva 24: Spot-optimoinnin laskennalliset säästöt

Spot-markkinaoptimoinnin lisäksi tarkasteltu 100 kW:n joustopotentiaali voidaan ohjata myös reservimarkkinoille, ja eri reservituotteista saatavat vuosittaiset tuotot on esitetty kuvassa 25. Laskennan perusteella reservimarkkinoilta saatava tuottopotentiaali on ollut vuosina 2023 ja 2024 noin 20 000 euroon vuodessa, mikä on hieman enemmän kuin vastaava spot-optimoinnilla saavutettava hyöty. Reservituotteiden hintatason laskun takia vuonna 2025 tulopotentiaali oli vain noin 10 000 € ja trendi on laskusuunnassa. Samoin kuin

sähkövaraston tapauksessa, lisähyötyjä on kuitenkin saatavilla ennustamalla ja optimoimalla markkinaosallistumista eri reservituotteiden ja spot-optimoinnin välillä.



Kuva 25: 100 kW joustolla saatavat tuotot reservituotteittain

Haasteita talotekniikan joustoon aiheuttaa FRR tuotteiden pitkät aktivointiajat, jolloin pelkästään talotekniikan tarjoaminen voi aiheuttaa olosuhteiden heikentymisen. Virtuaalivoimalan kokonaisuudessa tätä voidaan kuitenkin ajatella lisäjoustopotentiaalina, ja sisäolosuhteiden mukaan voidaan joustaa myös muilla kokonaisuuden komponenteilla. Vastaavasti on mahdollista hyödyntää useamman kiinteistön talotekniikan, jos kiinteistöt on aggregoitu yhteen ja ohjaus on keskitetty. Tällöin joustopotentiaalia saadaan kasvatettua, ja jousto voidaan kohdentaa niihin kiinteistöihin, joissa sisäolosuhteet sen sallivat.

Rahallisten hyötyjen lisäksi rakennusautomaatiojärjestelmästä saadaan myös laadullisia hyötyjä, kun mittarointia ja ohjausmahdollisuuksia lisätään. Laajempi ja tarkempi mittarointi mahdollistaa energiavirtojen hallinnan yksityiskohtaisemmin kuin perinteisessä rakennusautomaatiossa. Tällöin lämmitystä, ilmanvaihtoa ja muita taloteknisiä järjestelmiä voidaan säätää tilakohtaisesti, ja samalla saadaan aiempaa tarkempi ja ajantasaisempi kokonaiskuva rakennuksen tilakohtaisista sisäolosuhteista. Lisäksi yksityiskohtainen mittarointi luo edellytykset ennakoivalle ylläpidolle, kun sähkön- ja lämmönkulutusta voidaan seurata laite- ja järjestelmätasolla. Poikkeamat normaalista kulutuskäyttäytymisestä voidaan tunnistaa varhaisessa vaiheessa, mikä helpottaa vikojen paikantamista ja tukee kunnossapidon suunnittelua. Näin rakennusautomaatiojärjestelmän kehittäminen tukee taloudellisten hyötyjen ohella myös kiinteistön käytettävyyttä ja elinkaaren hallintaa.

4 Kiinteistön kriisinsietokyky

Tässä luvussa tarkastellaan julkisten kiinteistöjen kriisinsietokykyä eli resilienssiä energiajärjestelmien näkökulmasta. Tavoitteena on kuvata nykytilannetta Senaatti-kiinteistöjen rakennuksissa sekä arvioida, millä tavoin virtuaalivoimalan eri osat parantavat yksittäisen kiinteistön toimintavarmuutta ja huoltovarmuutta poikkeustilanteissa. Resilienssi on erityisen tärkeää julkisten toimijoiden kiinteistöissä, joissa ylläpidetään yhteiskunnan kriittisiä toimintoja, joiden on pysyttävä käynnissä myös häiriötilanteissa.

4.1 Kriisinsietokyvyn tarve ja sen nykytila

Resilienssi tarkoittaa kykyä ylläpitää toimintaa ja palautua nopeasti normaalitilaan häiriön jälkeen. Kiinteistöjen energiajärjestelmän resilienssillä viitataan energiansaannin toimintavarmuuteen tilanteissa, joissa esiintyy sähkö- tai lämpökatkoja, häiriöitä polttoainejakelussa tai poikkeuksellista vaihtelua energiamarkkinoilla. Julkisessa kiinteistökannassa energiajärjestelmien resilienssi liittyy tilojen käytettävyyden varmistamiseen häiriö- ja poikkeusoloissa. Osa tiloista palvelee toimintoja, joiden jatkuvuus on keskeistä myös pitkittyneissä häiriötilanteissa, ja Senaatti-kiinteistöjen tehtävänä on huolehtia toimitilojen käytettävyydestä ja toimintaedellytyksistä kaikissa olosuhteissa.

Energian saatavuus, erityisesti sähkön ja lämmön toimitusvarmuus, on yksi keskeinen tekijä kiinteistöjen toiminnan jatkuvuuden kannalta. Energiajärjestelmiin kohdistuvat varautumis- ja kehittämistoimenpiteet tukevat kiinteistöjen käyttövarmuutta sekä osaltaan valtionhallinnon varautumista ja huoltovarmuutta laajemmin. Euroopan kasvanut geopoliittinen epävarmuus on korostanut tarvetta vahvistaa energiainfrastruktuurin häiriönsietokykyä, johon Senaatti-kiinteistöt on jo vastannut asettamalla kriittisiin kohteisiin varavoimakoneita sähkönsaannin turvaamiseksi.

Varavoimakoneet ja niiden polttoainesäiliöt mitoitetaan kattamaan kiinteistöjen kriittisten järjestelmien tarpeet vähintään 72 tunnin ajaksi, mikä perustuu viranomaisohjeisiin ja vastaa kotitalouksille annettua omatoimisen varautumisen suositusta. Varavoimakoneet siis turvaavat sähkönsaannin alle kolmen päivän häiriötilanteissa, mutta pitkittyneissä tilanteissa

kiinteistöjen toiminta on riippuvainen polttoainejakelun jatkuvuudesta. Varavoimakoneisiin ei ole myöskään asennettu lämmön talteenottoa, mikä tekee kaukolämpöverkosta edelleen kriittisen lämmönsaannin kannalta.

Kiinteistöjen lämmöntuotanto perustuu useimmissa kohteissa edelleen täysin kaukolämpöön, mikä tarkoittaa, että lämpöverkon häiriöt vaikuttavat suoraan kiinteistön toimintaan. Joihinkin kohteisiin on asennettu vaihtoehtoisia lämmönlähteitä, joilla voidaan taata lämmöntuotantoa kriisitilanteissa, mutta case-kiinteistössä tällaista ei ole. Taloteknisten järjestelmien digitalisaatio ja ohjauskyvykkyys ovat toistaiseksi täysin manuaalista, mikä rajoittaa kiinteistöjen kykyä priorisoida kuormia tai vaihtaa eri lämmönlähteiden välillä dynaamisesti. Joihinkin kiinteistöihin on ohjelmoitu valmiiksi energiansäästötila sähköpulan varalta, joka lopettaa kaikki ei-kriittiset kuormat kerralla. Tämä ohjelma vaatii kuitenkin manuaalista säätöä, eikä mahdollista yksityiskohtaisempaa ohjausta.

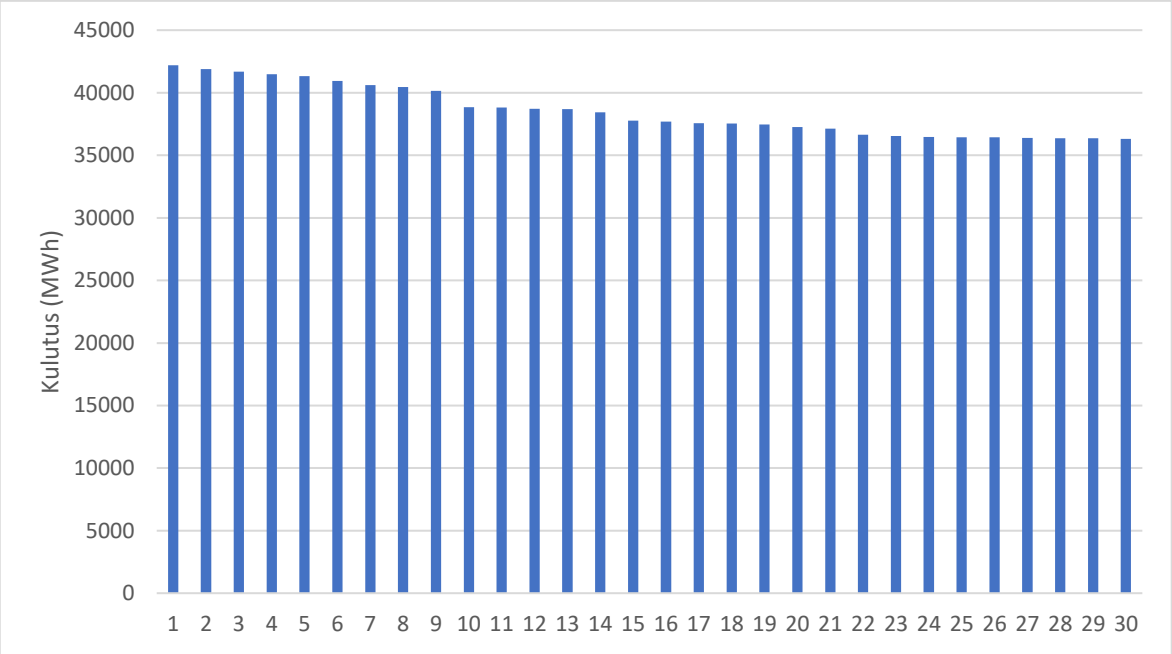
Resilienssin parantaminen voidaan lähes aina nähdä lisäkustannuksena, sillä varajärjestelmät eivät tuota taloudellista hyötyä normaalioloissa. Esimerkiksi varavoimakoneiden hankintahinta, huollot sekä testiajot aiheuttavat kustannuksia, vaikka todellista käyttötarvetta ei koskaan syntyisi. Virtuaalivoimalan tapauksessa tilanne on kuitenkin olennaisesti erilainen, sillä hybridilämmitys, kiinteistöakku, kysyntäjousto ja automaattinen energianohjaus mahdollistavat säästöjä myös normaalitilanteessa. Näin osa resilienssi-investoinnin kustannuksista voidaan kattaa markkinatuotoilla, energiatehokkuushyödyillä ja kulutusjouston kautta syntyvillä säästöillä. Tämä muuttaa resilienssin luonteen pelkästä staattisesta varautumisesta järjestelmäksi, joka tuottaa arvoa myös ilman kriisitilannetta.

4.2 Virtuaalivoimalan hyödyt toimitusvarmuuteen

Virtuaalivoimalan kokonaisuus parantaa kiinteistön energiajärjestelmän toimitusvarmuutta usealla toisiaan tukevalla tavalla. Sen eri osat vähentävät riippuvuutta ulkoisista energiamarkkinoista, parantavat toimintakykyä häiriötilanteissa ja tuovat joustavuutta pitkittyneisiin kriiseihin, joissa perinteinen varavoimakapasiteetti ei yksin riitä. Virtuaalivoimala ei korvaa varavoimakonetta, mutta täydentää sitä tuomalla paremmat keinot kuorman hallintaan, vaihtoehtoisen energialähteen ja mahdollisuuden hyödyntää energiavarastoja tehokkaasti. Kokonaisuus muodostaa pienen energiapuskurin, joka mahdollistaa sekä lyhyet

mikro-saarikäytön jaksot että hidastaa polttoaineen ja muun energian kulumista pitkissä kriiseissä.

Sähköakusto vahvistaa kiinteistön sähköresilienssiä erityisesti lyhyissä ja keskipitkissä häiriötilanteissa. Täyteen ladattuna se kykenee ylläpitämään kiinteistön kriittisiä kuormia muutamien tuntien ajan, ja pitkissä kriiseissä se mahdollistaa joustavamman sähkönkulutuksen hallinnan. Lisäksi se mahdollistaa vaihdon verkkovirrasta varavoimakoneen varaan ilman käyttäjälle näkyvää katkoa. Kuvassa 26 on esitetty case-kiinteistön suurimmat kolmen vuorokauden kulutuspiikit vuodelta 2024. Kriisitilanteessa kiinteistön sähkönkulutusta voidaan pudottaa noin puoleen keskittämällä energiankäyttö vain kriittisiin tiloihin ja toimintoihin. Tässä tapauksessa 1 MWh varakapasiteetti riittäisi kattamaan kiinteistön sähköntarpeen noin neljäksi tunniksi.



Kuva 26: Case-kiinteistön suurimmat kolmen vuorokauden kulutuspiikit vuodelta 2024

Neljän tunnin varakapasiteetin avulla esimerkiksi kiertävien sähkökatkojen vaikutuksia voidaan lieventää tai jopa täysin välttää, jolloin varavoimakonetta ei tarvitse käynnistää jokaisessa lyhyessä katkossa. Akuston ja varavoimakoneen yhteiskäytöllä on myös muita hyötyjä. Esimerkiksi varavoimakoneen käydessä sen mahdollinen ylituotto voidaan ohjata akkuun, jolloin konetta voidaan ajaa vakaalla kuormalla sen parhaalla hyötysuhteella ja ilman karstoittumista. Litiumioniakuston ja dieselgeneraattorin yhteiskäytöllä on tutkimuksissa saavutettu noin 10 % säästöt polttoainekustannuksissa (Damian et al. 2025), mutta tulosten

yleistettävyys riippuu paljon dieselmoottorin lähtötasosta. Hybridiajolla voidaan joka tapauksessa pidentää käytettävissä olevaa toiminta-aikaa.

Akusto toimii myös puskurina äkillisiä kuormapiikkejä vastaan ja voi pienentää riskiä varavoimakoneen käynnistyshäiriöihin. Lisäksi pitkittyneissä kriisitilanteissa kuormat voidaan ohjata varavoimakoneelta kokonaan energiavarastolle, jolloin varavoimakonetta voidaan huoltaa ilman katkoja kiinteistön sähkön saannissa. Jatkuvassa ajossa varavoimakoneita tulee huoltaa tyypillisesti noin kuuden vuorokauden välein, jolloin sähköt joudutaan katkaisemaan.

Energiavaraston ja virtuaalivoimalan kokonaisuus mahdollistaa myös UPS-järjestelmien mitoituksen keventämisen ilman, että toimitusvarmuus heikkenee. Kun kiinteistössä on useiden tuntien energiantarpeen kattava energiavarasto, UPS-järjestelmän rooli voidaan rajata lyhytaikaiseen katkottomaan siirtymään verkosta energiavaraston tai varavoimakoneen taakse. Tällöin suuren UPS-akuston sijaan riittää esimerkiksi muutaman minuutin mitoitus, jonka aikana sähkönsyöttö siirtyy hallitusti ilman käyttäjälle näkyvää katkosta. Tämä yhdistelmä tuo sillä kustannus- ja tilansäästöjä, sillä suuren energiavaraston kustannus kilowattituntia kohden on tyypillisesti selvästi alhaisempi kuin vastaavan kapasiteetin UPS-akuston. Tällainen ratkaisu tulee kuitenkin käytännössä ajankohtaiseksi vasta UPS-järjestelmän uudelleenhankinnan tai uudisrakentamisen yhteydessä, eikä sitä siten ole huomioitu investointilaskennassa.

Keskeinen rajoite on kuitenkin akuston varaustilan hallinta, sillä täysin yllättävissä sähkökatkoissa akusto ei välttämättä ole täynnä. Tällöin akustossa ei ole energiaa kattamaan kiinteistön sähköntarvetta kuin lyhyeksi aikaa. Pitkittyneisiin kriisitilanteisiin tai pitkittyneeseen energiapulaan voidaan kuitenkin todennäköisemmin varautua etukäteen, jolloin muu akuston toiminta voidaan lopettaa ja pitää akun varaustaso ennaltaehkäisevästi täynnä. Eräs akuston resilienssihyöty on myös sen siirrettävyys, joka mahdollistaa varakapasiteetin siirtämisen kulloinkin kriittisimpiin kohteisiin. Akustokontin siirtäminen voi kuitenkin olla logistisesti hankalaa kriisitilanteen aikana.

Hybridilämmityskontti puolestaan lisää lämmönsaannin varmuutta tilanteissa, joissa kaukolämpöverkko tai sen tuotanto on häiriintynyt. Se pienentää yhden pisteen riskiä ja tuottaa vaihtoehtoisen lämmönlähteen ilman riippuvuutta ulkopuolisesta lämmönlähteestä tai polttoaineketjusta. Lämpöpumpun hyötysuhde tekee siitä erityisen hyödyllisen tilanteissa, joissa

sähköä on rajallisesti, mutta ei kokonaan poikki, sillä hyvän COP-arvon ansiosta pienemmällä sähkömäärällä saadaan enemmän lämpöä kuin esimerkiksi sähkökattilalla. Hybridijärjestelmä kykenee ylläpitämään kiinteistön peruslämmön, vaikka se ei kattaisi koko lämmöntarvetta. Tämä suojaa rakenteita, putkistoja ja rakennuksen sisäolosuhteita pitkäkestoisen lämmönjakeluhäiriön aikana.

Tilanteessa, jossa sekä sähkö- että kaukolämpöverkko ovat vioittuneet, hybridilämpövoimalalla voidaan tuottaa lämpöä, jos varavoimakoneessa on ylimääräistä tehoa. Tällaisessa skenaariossa varavoimakoneen hukkalämmön talteenotto voisi mahdollistaa lämmönsaannin myös suoraan moottorin jäähdytys- ja pakokaasulämmöstä. Tämä parantaa polttoaineen kokonaishyötysuhdetta merkittävästi ja mahdollistaa korkean järjestelmätason COP-arvon myös kriisitilanteissa, joissa käytettävissä oleva energiamäärä on erittäin rajallinen. Myös hybridilämmityskontti on mahdollista siirtää, mutta siirtämisessä on samat rajoitukset kuin sähköakuston kohdalla, eli siirtäminen ei välttämättä ole mahdollista kriisitilanteen aikana.

Älykäs energianohjaus toimii virtuaalivoimalan koordinoivana osana ja varmistaa energian kohdentumisen oikein myös kriisitilanteissa. Järjestelmän avulla voidaan tunnistaa kiinteistön kriittiset ja ei-kriittiset kuormat ja kyetään automaattisesti irrottamaan vähemmän tärkeät järjestelmät, kuten ei-välttämättömän valaistuksen tai ilmanvaihdon tehostuksen. Tämä pienentää kokonaisenergian tarvetta ja pidentää sekä varavoimakoneen että akuston käyttöaikaa. Keskeisenä hyötynä on kuormien muuttamisen lisäksi myös niiden yksityiskohtainen seuranta. Järjestelmän avulla voidaan seurata tarkasti energian kulutusta, ja karsia kulutusta tarpeen mukaan yksittäisistä järjestelmistä tai laitteista.

Kokonaisuutena virtuaalivoimala parantaa kiinteistön kykyä säilyttää toimintakyky sekä lyhyissä että pitkittyneissä kriisitilanteissa. Se mahdollistaa mikro-saarikäytön lyhyiksi jaksoiksi ja vähentää riippuvuutta ulkopuolisista energialähteistä silloin, kun infrastruktuuri on vaurioitunut tai toimintakyvytön. Pitkissä kriisitilanteissa kokonaisuus antaa kiinteistölle joustoa, jolla varavoimakoneen rajoituksia voidaan lieventää erityisesti tilanteissa, joissa polttoainetoimitukset, sähköverkko tai kaukolämmön tuotanto ovat epävarmoja. Huomionarvoista on myös, että virtuaalivoimala ei lisää kansallisen energiajärjestelmän kuormitusta kriisiaikana, vaan päinvastoin keventää sitä käyttämällä saatavilla olevat resurssit mahdollisimman tehokkaasti, mikä parantaa koko energiajärjestelmän resilienssiä.

4.3 Kriisinsietokyvyn arvottaminen rahassa

Kriisinsietokyvyn rahallinen arvottaminen on haastavaa, sillä resilienssihyödyt eivät lähtökohtaisesti näy markkinahinnoissa. Resilienssiä ei voi mitata suoraan tuotettuna energiana, eikä sen arvoa voi johtaa esimerkiksi sähkön hinnasta. Laws et al (2018) tutkimuksen mukaan resilienssihyötyjen huomioiminen investointilaskennassa voi kuitenkin muuttaa investoinnin kannattavaksi, vaikka se olisi muuten taloudellisesti rajatapaus. Tämä korostaa sitä, että resilienssi on olennainen osa investoinnin kokonaishyötyä.

Mark et al (2018) tutkimuksessa on kehitetty metodologia arvottamaan resilienssin parantamiseen keskittyviä investointeja. Viitekehyksessä kartoitetaan nykyinen kriisinsietokyky, tunnistetaan mahdolliset riskit ja kehitetään eri vaihtoehdot riskien minimoimiseksi, jonka jälkeen eri vaihtoehdoille suoritetaan hyötykustannusanalyysi. Tätä metodologiaa voidaan soveltaa myös tämän virtuaalivoimalan resilienssihyötyjen arvioinnissa arvioimalla resilienssiriskit, joita virtuaalivoimalalla voidaan lieventää.

Virtuaalivoimalan resilienssihyötyjä voidaan tarkastella kolmena eri kategoriana: toiminta-ajan pidentyminen, energiatehokkaampi varavoimakäyttö sekä lämmönsaannin varmistaminen kriisitilanteessa. Case-kiinteistössä on jo varavoimakone, joten säästöä ei voida suoraan mitata toiminnan keskeytymisen kustannuksella. Virtuaalivoimala kuitenkin pidentää kiinteistön toimintakykyä sähkökatkon aikana vähintään neljällä tunnilla, mikä hidastaa polttoaineen kulumista, vähentää varavoimakoneen käynnistystarpeita ja mahdollistaa tehokkaamman kuormahallinnan. Vaikka 1 MWh sähköenergiaa maksaa normaalioloissa 20–100 €, voi sen arvo kriisitilanteessa olla huomattavasti suurempi, etenkin jos polttoainejakelu on häiriintynyt.

Suurin yksittäinen hyöty syntyy lämmityksen varmistamisesta. Ilman hybridilämpöä kiinteistö olisi täysin riippuvainen kaukolämmöstä, ja pitkä häiriö voisi johtaa sisäolosuhteiden merkittävään heikkenemiseen ja jopa toiminnan keskeytymiseen. Sillä kyseessä on julkinen kiinteistö, toiminnalle on hankala muodostaa markkinaehtoista kustannusta esimerkiksi menetetyn tuotannon perusteella. Kyseessä on osa yhteiskunnan perusinfrastruktuuria, joten toimintojen on toimittava myös poikkeusoloissa. Tämä tarkoittaa, että resilienssihyödyn arvo voidaan rinnastaa vaihtoehtoiseen tapaan, jolla lämmitys olisi muuten turvattu. Esimerkiksi öljykattila ei tuota arvoa normaalioloissa, jolloin kaikki siihen liittyvät kustannukset voidaan ajatella virtuaalivoimalan säästönä.

Akuston ja älyohjauksen tuoma joustavuus voidaan arvottaa samoin periaattein. Kriisitilanteessa automaattisesti toteutettu kuormien priorisointi hidastaa sekä sähkön että polttoaineen kulumista ja voi pidentää toiminta-aikaa useilla tunneilla. Tällä on energiasäästön lisäksi merkittävä operatiivinen arvo. Mitä pidempään kiinteistö pystyy toimimaan ilman manuaalista kuormanhallintaa tai päätöksentekoa, sitä vähemmän henkilöstöltä ja viranomaisilta kuluu resursseja energianhallintaan. Tätä voidaan arvioida esimerkiksi säästyneellä työajalla, joka on kriisitilanteessa erittäin arvokasta.

Kokonaisuutena virtuaalivoimalan koko kriisinsietokyvyn hyötyjä on haastava mitata rahallisesti, mutta varsinkin lämmityksen varmentaminen voidaan sisällyttää investointilaskelmaan vältettyjen varautumisinvestointien, eli öljylämmityskattilan hankintahinnan ja huoltojen hinnan kautta. Tämän investoinnin elinkaarikustannukset voidaan diskontata nykyhetkeen ja käsitellä investointilaskelmassa virtuaalivoimalan hankintahintaa pienentävänä tekijänä. Näin resilienssihyöty voidaan huomioida kustannusperusteisesti, ilman että tehdään oletuksia kriisitilanteiden todennäköisyydestä tai kestosta.

Muut virtuaalivoimalan resilienssiä parantavat vaikutukset, kuten polttoaineen säästö ja operatiivisen kuormituksen väheneminen, jätetään tämän laskelman ulkopuolelle. Näin ollen tulokset edustavat konservatiivista arviota järjestelmän kokonaishyöydyistä, ja muita vaikutuksia voidaan arvioida kannattavuuslaskennan jälkeen. Seuraavassa luvussa virtuaalivoimalan taloudellista kannattavuutta tarkastellaan kokonaisuutena, jossa myös edellä kuvatut, kustannusperusteisesti huomioidut resilienssihyödyt sisällytetään investointilaskentaan.

5 Taloudellinen ja ympäristöllinen analyysi

Tässä luvussa tarkastellaan virtuaalivoimalan taloudellista kannattavuutta sekä arvioidaan sen ei-rahallisia vaikutuksia. Luvun aluksi esitellään kannattavuuslaskennassa käytettävät menetelmät ja keskeinen termistö. Tämän jälkeen suoritetaan varsinainen kannattavuuslaskenta tarkasteltavalle investointikokonaisuudelle, ja kolmannessa alaluvussa analysoidaan laskennan herkkyyttä keskeisille oletuksille ja lähtöarvoille. Luvun lopuksi käsitellään virtuaalivoimalan ei-rahallisia vaikutuksia, erityisesti ympäristövaikutuksia ja muita laadullisia hyötyjä, joita ei voida suoraan sisällyttää taloudellisiin laskelmiin.

5.1 Kannattavuuslaskennan menetelmät

Virtuaalivoimalan kaltaisen energiajärjestelmäinvestoinnin taloudellisen kannattavuuden arviointi edellyttää menetelmiä, jotka huomioivat investoinnin pitkän elinkaaren, rahan arvon alenemisen sekä tulevaisuuteen liittyvän epävarmuuden. Tässä käytetään vakiintuneita investointilaskennan menetelmiä, jotka ovat nettonykyarvo, koroton takaisinmaksuaika sekä sisäinen korkokanta.

Nettonykyarvomenetelmä on keskeinen investointilaskennan työkalu, sillä se huomioi rahan aika-arvon ja tarkastelee investoinnin koko elinkaaren aikaiset kassavirrat diskontattuna tarkasteluhetkeen. Se on myös tässä työssä ensisijainen kannattavuusmittari, sillä se mittaa investoinnin absoluuttista taloudellista arvonlisää. Investointi on nettonykyarvon perusteella kannattava silloin, kun diskontattujen kassavirtojen summa ylittää alkuperäisen investointikustannuksen ja nettonykyarvo on positiivinen (Brealey et al. 2022, 132) Menetelmän etuna on, että sen avulla voidaan vertailla keskenään myös vaihtoehtoisia investointeja, kuten virtuaalivoimalakokonaisuutta ja erillistä öljykattilahankintaa, huomioiden molempien ratkaisujen elinkaarikustannukset ja -hyödyt. Tällöin vaihtoehtoiskustannus voidaan sisällyttää tarkasteluun vertaamalla eri investointien nettonykyarvoja keskenään (Brealey et al. 2022, 123).

Nettonykyarvolaskennan keskeinen parametri on laskentakorko, joka määrittää tulevien kassavirtojen nykyarvon ja kuvaa rahan arvon heikentymistä. Laskentakorko ottaa huomioon

koron pääomaa kerryttävän vaikutuksen eli korkoa korolle -ilmiön. Tyypillisesti laskentakorko määritellään yrityksen pääoman kustannuksen tai organisaation sisäisesti asetetun tuottovaatimuksen perusteella (Pellinen 2019, 176). Senaatti-kiinteistöt ei julkisena toimijana aseta investoinneille varsinaista pääoman tuottotavoitetta, mutta yleisenä investointilaskennan laskentakorkona käytetään viiden prosentin arvoa. Käytetty laskentakorko huomioi rahan arvon heikentymisen sekä investointiin liittyvän epävarmuuden ilman suurta riskilisää.

Nettonykyarvon lisäksi investoinnin kannattavuutta arvioidaan korottoman takaisinmaksuajan avulla. Koroton takaisinmaksuaika on yksinkertainen ja helposti tulkittava kannattavuusmittari, joka kuvaa, kuinka nopeasti investoinnin alkuperäinen investointikustannus katetaan kumulatiivisilla kassavirroilla. Menetelmän etuna on sen yksinkertaisuus ja helppo havainnollistettavuus, mutta siihen liittyy useita tunnettuja rajoitteita. Se ei huomioi rahan aika-arvoa eikä takaisinmaksuajan jälkeisiä kassavirtoja, jolloin se soveltuu huonosti investoinnin kokonaistaloudellisen kannattavuuden arviointiin (Brealey et al. 2022, 178–179). Tässä työssä korotonta takaisinmaksuaikaa käytetään täydentävänä mittarina, sillä tarkasteltavan virtuaalivoimalainvestoinnin kassavirrat ovat oletuksiltaan suhteellisen tasaisia vuodesta toiseen, jolloin menetelmän rajoitteet eivät korostu yhtä voimakkaasti.

Kolmantena kannattavuusmittarina tarkastellaan sisäistä korkokantaa, joka kuvaa investoinnin tuottoastetta. Sisäinen korkokanta määritellään siksi laskentakoroksi, jolla investoinnin nettonykyarvo on nolla. Investointi on lähtökohtaisesti kannattava, mikäli sisäinen korkokanta ylittää investoinnin rahoituskustannuksen tai pääoman vaihtoehtoistuoton. Menetelmän etuna on, että se tuottaa yhden numeerisen arvon, jonka tulkinta ei riipu suoraan valitusta laskentakorosta, ja mahdollistaa investoinnin vertaamisen yleisiin tuottovaatimuksiin (Brealey et al. 2022, 185). Sisäisen korkokannan rajoitteena on kuitenkin se, ettei se huomioi investointien absoluuttista kokoa. Tämän seurauksena investointi, jolla on korkea sisäinen korko, voi kokonaisuudessaan tuottaa vähemmän taloudellista arvoa kuin investointi, jonka sisäinen korko on matalampi mutta nettonykyarvo suurempi (Brealey et al. 2022, 185). Tästä syystä myös sisäistä korkokantaa käytetään tässä työssä täydentävänä, eikä ensisijaisena mittarina.

Yhdessä nettonykyarvo, koroton takaisinmaksuaika ja sisäinen korkokanta muodostavat toisiaan täydentävän kokonaisuuden, jonka avulla virtuaalivoimalan kannattavuutta voidaan arvioida sekä rahan aika-arvon että päätöksenteon käytännöllisyyden näkökulmista. Näitä kolmea menetelmää täydennetään suorittamalla myös herkkyysanalyysi, jonka avulla

voidaan selvittää kuinka herkkiä eri kannattavuusmittarit ovat muutoksille oletusarvoissa. Investointilaskelmien oletuksiin sisältyy aina epävarmuutta, jota ei voida täysin poistaa. Herkkyysanalyysin avulla voidaan kuitenkin systemaattisesti analysoida, miten investoinnin kannattavuus muuttuu, kun yhtä parametria muutetaan kerrallaan. (Dayananda et al. 2002, 134–135)

Seuraamalla muutoksia käytettyihin kannattavuusmittareihin, voidaan todeta ne tekijät, jotka ovat kaikkein herkimpiä muutoksille. Näin saadaan parempi käsitys investoinnin riskeistä ja niiden vaikutuksista. Herkkyysanalyysi ei poista epävarmuutta, mutta se tukee investointipäätöstä tekemällä riskiprofiilin näkyvämmäksi. Työn myöhemmässä vaiheessa herkkyysanalyysiä jatketaan skenaarioanalyysillä, joka antaa vielä kattavamman kuvan investoinnin riskeistä.

5.2 Järjestelmän kannattavuus

Tässä alaluvussa arvioidaan virtuaalivoimalakokonaisuuden taloudellista kannattavuutta koko järjestelmän tasolla. Tarkastelujaksoksi on valittu 15 vuotta, mikä vastaa erityisesti akuston ja hybridilämmitysjärjestelmän teknistä ja toiminnallista elinikää. Laskentakorkona käytetään viittä prosenttia, eikä inflaatiota huomioida erikseen, vaan laskenta tehdään reaalisilla kassavirroilla. Jäännösarvon oletetaan olevan nolla, sillä järjestelmän purkukustannusten oletetaan olevan suuruusluokaltaan samaa tasoa kuin mahdollinen jäljellä oleva tekninen arvo, minkä lisäksi tarkastelujakson lopussa jäännösarvo diskontattuna nykyarvoon on joka tapauksessa vähäinen.

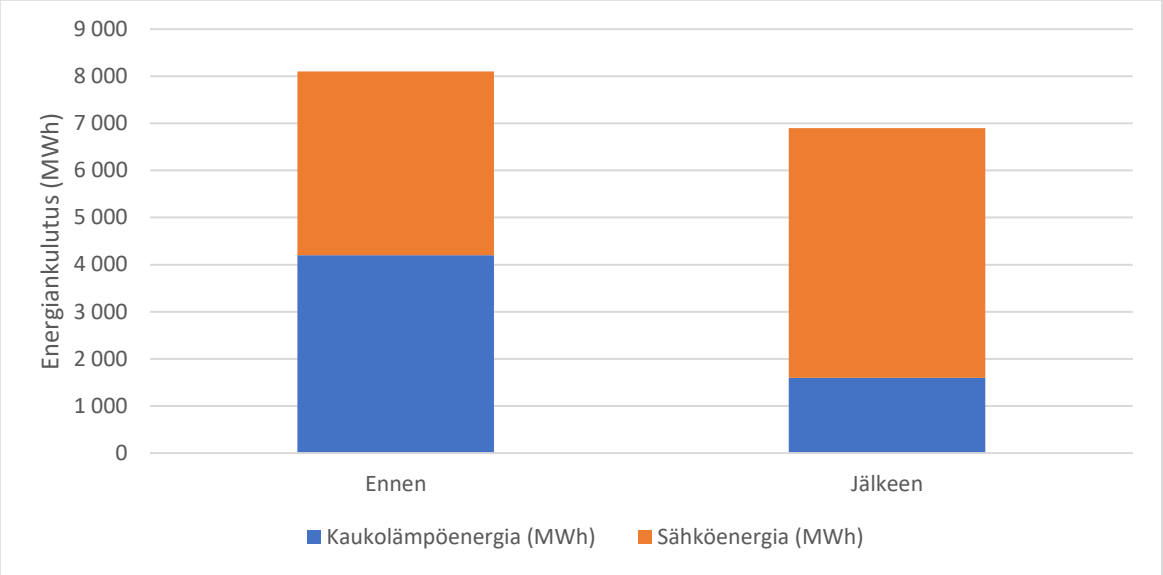
Virtuaalivoimalakokonaisuuden alkuinvestointi perustuu toimittajavuoropuheluiden perusteella saatuihin kustannusarvioihin. Sähköakuston investointikustannus on 400 000 €, hybridilämmityskontin 400 000 € ja älykkään energianohjausjärjestelmän noin 20 000 €. Alkuinvestoinnin teknisten laitteiden kokonaismäärä on siten 820 000 €. Lisäksi alkuinvestointiin sisältyy suunnittelu- rakentamis- ja integraatiokustannuksia, joten kokonaiskustannuksiksi voidaan arvioida yhteensä noin 1 200 000 €. Järjestelmän käytöstä aiheutuvat vuosittaiset kustannukset on arvioitu olevan noin 75 000 € vuodessa. Vuosikustannukset koostuvat muun muassa huolloista, ohjelmisto- ja lisenssimaksuista sekä mahdollisista reservioperaattorin palvelumaksuista, ja niiden oletetaan pysyvän vakiona koko tarkastelujakson ajan.

Virtuaalivoimalan taloudelliset hyödyt muodostuvat useista osatekijöistä, joita on esitelty luvussa 3. Kannattavuuslaskelmassa käytettävät tuloarviot perustuvat tarkastelujakson 2021–2025 historiadatan, mutta arvioista on pyritty vähentämään energiakriisin poikkeukselliset vaikutukset. Spot-sähkön hinnan optimoinnista syntyvät hyödyt perustuvat sähkön varastointiin sekä talotekniikan joustoon. Akuston avulla saavutettavan spot-hintaoptimoinnin vuotuiseksi hyödyksi on arvioitu 20 000 €, ja talotekniikan kuormien ajoittamisesta saatavaksi hyödyksi 10 000 € vuodessa.

Reservimarkkinoille osallistumisesta saatavat tulot muodostavat merkittävän osan järjestelmän kassavirroista. Akuston osallistumisesta reservimarkkinoille saatavaksi vuotuiseksi tuloksi on arvioitu 80 000 €. Talotekniikan jouston osuudeksi reservimarkkinoilla on arvioitu 5 000 € vuodessa, ja hybridilämmitysjärjestelmän osallistumisesta reservitoimituksiin 20 000 € vuodessa. Arviot perustuvat käytettävissä olevaan joustokapasiteettiin sekä historiallisiin reservimarkkinahintoihin. Arviot ovat realistisia, mutta edellyttävät optimointia eri reservituotteiden ja spot-optimoinnin välillä.

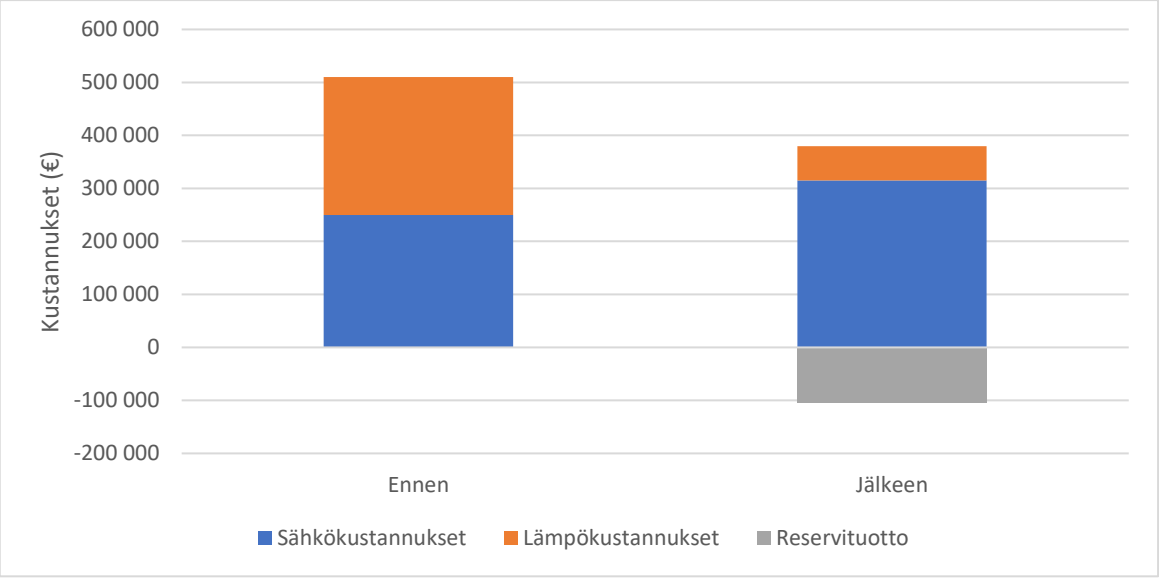
Hybridilämmitysjärjestelmä kykenee saavuttamaan suoria, noin 100 000 € vuotuisia säästöjä energiahankinnassa. Tämä säästöpotentiaali perustuu sähkön ja kaukolämmön väliseen hintaeroon, mutta laskelma ei sisällä perusmaksujen muutoksia. On huomioitava, että järjestelmän eri komponentit vaikuttavat tehomaksuihin eri tavoin. Virtuaalivoimalan käyttö saattaa nostaa tarvittavaa sähkötehoa, kun taas hybridilämmitys voi samanaikaisesti alentaa kaukolämmön perusmaksua. Lisäksi sähkövaraston tarjoama huipputehon leikkaus kompensoi mahdollisia sähköverkon kuormituspiikkejä. Näiden ristiin vaikuttavien tehomaksumuutosten nettoarvon arvioidaan kuitenkin olevan marginaalinen suhteessa hankkeen muihin kassavirtoihin, eikä niiden tarkempi mallintaminen muuttaisi investoinnin taloudellisia johtopäätöksiä.

Virtuaalivoimalan vaikutuksia case-kiinteistön energianhankintaan on kuvattu kuvassa 27, josta on nähtävissä, miten kaukolämmön kulutus laskisi huomattavasti. Sähkönkulutus ei lämpöpumpun energiatehokkuushyötyjen ansiosta nouse vastaavaa määrää, vaan kokonaisenergiankulutus laskisi jopa 1 000 MWh vuodessa, ja prosentuaalisesti tämä on noin 13 % säästö energian määrässä. Senaatti-kiinteistöjen tavoitteena on vähentää energiankulutusta yksi prosentti vuosittain, joten lämpöpumppuratkaisut tarjoavat hyvän keinon saavuttaa tämä tavoite myös tulevaisuudessa.



Kuva 27: Virtuaalivoimalan vaikutukset case-kiinteistön energianhankintaan

Virtuaalivoimalan taloudellisia vaikutuksia on esitetty kuvassa 28. Kuvaajasta on nähtävissä, miten kaukolämpöenergian kustannukset laskevat reilusti, ja korkeimmista sähköenergiakustannuksista huolimatta kokonaisenergiakustannukset laskisivat yli 100 000 € vuodessa. Kun huomioidaan myös reservimarkkinatuotot energiakustannuksia alentavana tekijänä, case-kiinteistön energiakustannukset laskevat jopa 46 %. Vastaavasti energian yksikkökustannus laskisi arvosta 63 €/MWh arvoon 55 €/MWh, ja reservituotot huomioiden energian yksikkökustannus olisi vain 39 €/MWh.



Kuva 28: Virtuaalivoimalan vaikutukset case-kiinteistön energiakustannuksiin

Kannattavuus arvioidaan kahdessa osassa. Ensimmäisessä osassa tarkastellaan järjestelmää ilman resilienssihyötyjä, ja huomioidaan ainoastaan markkinaehtoiset tulot ja energiansäästöt. Toisessa osassa resilienssihyödyt sisällytetään tarkasteluun vaihtoehtoiskustannuksen kautta. Resilienssihyöty kuvataan vältettynä investointina erilliseen öljykattilaan, jolla olisi muussa tapauksessa turvattu lämmönsaanti. Öljykattilan hankintahinnaksi on arvioitu 150 000 €, ja vuosikustannuksiksi 10 000 €. Tällöin 15 vuoden elinkaarikustannusten nykyarvo käytetyllä laskentakorolla on -240 000 €. Tätä kustannusta ei kuitenkaan käsitellä varsinaisena vuosittaisena kassavirtana, vaan se ajatellaan virtuaalivoimalainvestoinnin tuoman resilienssin arvoksi.

Järjestelmän vuotuiset nettokassavirrat muodostuvat edellä esitetyistä hyödyistä vähennettynä vuosittaisilla käyttökustannuksilla. Näiden kassavirtojen perusteella lasketaan nettonykyarvo, sisäinen korkokanta sekä koroton takaisinmaksuaika. Tuloksia tarkastellaan ensisijaisesti nettonykyarvon avulla, sillä se kuvaa investoinnin absoluuttista taloudellista arvonlisää ja soveltuu parhaiten myös vaihtoehtoisten ratkaisujen vertailuun.

Laskennassa oletetaan, että suurin osa hyödyistä voidaan saavuttaa samanaikaisesti, kunhan resurssien käyttöä optimoidaan jatkuvasti useiden vaihtoehtoisten hyötyjen välillä. Tämä perustuu siihen, että akustoa ja muita joustoresursseja ei ohjata kiinteästi yhtä käyttötarkoitusta varten, vaan resursseja tarjotaan aina sille markkinalle, josta saatava rahallinen hyöty on suurin. Näin ollen esitetyt hyödyt eivät ole kokonaan toisiaan poissulkevia, vaan edellyttävät keskitettyä ja älykästä ohjausta, joka on virtuaalivoimalakokonaisuuden keskeinen ominaisuus.

Järjestelmän kustannukset sekä tuotot on esitetty taulukossa 7. Taulukossa esitetyt tuotot on johdettu edellä kuvatuista spot-optimoinnin, reservimarkkinoiden ja lämmitysjärjestelmän hyödyistä yhdistämällä ne komponenttikohtaisiksi vaikutuksiksi. Virtuaalivoimalan vuotuiset hyödyt ovat yhteensä noin 235 000 €, joten vuotuisilla 75 000 € kustannuksilla nettokassavirta on 160 000 € vuodessa. Tämän kassavirran oletetaan pysyvän vakiona koko 15 vuoden tarkastelujakson ajan, jolloin se säilyy investoinnin vuosittaisena tuottona. Alkuinvestoinnin arvioitu koko on 1 200 000 € ja tässä laskelmassa siihen ei sisälly rahoituskustannuksia. Käytännössä virtuaalivoimalan komponentit voidaan hankkia myös palvelumallilla, mutta kannattavuuden arvioimiseksi tässä työssä käsitellään vain suoran hankinnan skenaario.

Taulukko 7: Virtuaalivoimalan kustannukset sekä vuosittaiset tuotot

Komponentti	**Investointikustannus (€)**	**Vuotuinen säästö/tuotto (€)**
Älykäs energianohjausjärjestelmä	20 000	+ 15 000
Sähkövarasto	400 000	+ 100 000
Hybridilämmitys	400 000	+ 120 000
Asennuttamiskustannukset	200 000	
Suunnittelukustannukset	180 000	
Vuosittaiset kulut		- 75 000
Yhteensä	**1 200 000**	**+ 160 000**

Taulukon 7 arvoilla investoinnin koroton takaisinmaksuaika on 7,5 vuotta, nettonykyarvo 440 000 € ja sisäinen korkokanta on 10,25 %. Investointia voidaan siis pitää kannattavana myös ilman resilienssihyötyjä, sillä sisäinen korkokanta ylittää laskennassa käytetyn viiden prosentin laskentakoron ja nettonykyarvo on positiivinen. Virtuaalivoimala tuottaa siis taloudellista lisäarvoa jo pelkästään markkinaehtoisten tulojen ja energiasäästöjen perusteella. Kannattavuusmarginaali on kuitenkin pieni, mikä tekee investoinnista herkän oletusten muutoksille, kuten investointikustannusten nousulle tai vuotuisten tuottojen alenemiselle.

Kun tarkasteluun sisällytetään myös lämmön varmistamiseen liittyvät resilienssihyödyt, ja nettonykyarvoon lisätään 240 000 €, investoinnin nettonykyarvo kasvaa 680 000 euroon. Resilienssihyötyjen huomioiminen ei muuta investoinnin vuotuisia kassavirtoja eikä takaisinmaksuaikaa, mutta se parantaa investoinnin kokonaisnettonykyarvoa merkittävästi. Koska kaikkia resilienssiin liittyviä laadullisia hyötyjä ei ole mahdollista sisällyttää laskentaan, investoinnin tuottama lisäarvo on todellisuudessa vielä tätäkin suurempi. Näin ollen investointia voidaan kokonaisuutena tarkastellen pitää perusteltuna sekä taloudellisesta että strategisesta näkökulmasta.

Case-kiinteistön tarkastelu osoittaa, että virtuaalivoimalakokonaisuuden taloudellinen hyöty syntyy ensisijaisesti lämpöenergian hankinnan muutoksista. Kaukolämmön kulutuksen voimakas väheneminen ja sähkön käytön lisääntyminen laskevat kokonaisenergiakustannuksia, vaikka sähkön hankinta kasvaa. Reservimarkkinoilta saatavilla tuloilla voidaan kompensoida kasvanutta sähkön hankintaa, jolloin kokonaisenergiakustannus laskee noin 46 % investoinnin ansiosta. Case havainnollistaa, että sähkönkulutuksen kasvu ei ole investoinnin kannattavuutta heikentävä tekijä, vaan edellytys hybridilämmityksen ja reservimarkkinaosallistumisen hyödyntämiselle.

Resilienssihyötyjen tarkastelu vaihtoehtoiskustannuksen kautta korostaa virtuaalivoimalan strategista merkitystä erityisesti kriittisessä kiinteistökannassa. Kyse ei ole pelkästään kustannussäästöstä, vaan siitä, että lämmöntuotannon varmistaminen voidaan toteuttaa osana normaalia käyttöä palvelevaa energiajärjestelmää. Tällöin resilienssi ei lisää järjestelmän käyttö- ja ylläpitokustannuksia, vaan syntyy investoinnin sivutuotteena. Tämä näkökulma tukee investoinnin perusteltavuutta myös tilanteissa, joissa puhtaasti taloudellinen kannattavuusmarginaali on rajallinen. Seuraavassa alaluvussa tarkastellaan herkkyysanalyysin avulla, kuinka investoinnin kannattavuus muuttuu, kun oletuksia muutetaan.

5.3 Herkkyysanalyysi

Herkkyysanalyysin tarkoituksena on arvioida, kuinka herkkiä virtuaalivoimalan kannattavuusmittarit ovat yksittäisten lähtöoletusten muutoksille. Investointilaskelmiin sisältyy väistämättä epävarmuutta erityisesti markkinahintojen, teknisen elinkaaren sekä kustannustason osalta, eikä näitä tekijöitä voida ennustaa luotettavasti koko tarkastelujakson ajalle. Analyysin avulla voidaan kuitenkin tunnistaa ne muuttujat, joilla on suurin vaikutus investoinnin kannattavuuteen, ja siten arvioida investointiin liittyvää riskiprofiilia systemaattisesti.

Herkkyysanalyysi toteutetaan muuttamalla yhtä parametria kerrallaan, muiden oletusten pysyessä peruslaskelman mukaisina. Tarkasteltavien muuttujien vaihteluväliksi on valittu ± 20 % ja ± 40 % peruslaskelman arvoista, jolloin jokaiselle parametrille annetaan viisi eri arvoa. Valitut vaihteluvälit ovat joidenkin parametrien osalta epätodennäköisiä, mutta riittävän suuret muutokset havainnollistavat investoinnin nettonykyarvon herkkyyttä yksittäisille oletuksille. Parametrien systemaattinen muuntelu mahdollistaa sekä epäedullisten että suotuisten markkina- ja kustannuskehitysten vaikutusten arvioinnin.

Tarkasteltavat muuttujat ovat:

- alkuinvestoinnin suuruus
- reservimarkkinoiden hintataso, eli reservituotto
- spot-markkinoiden hintatason vaihtelu
- yleinen sähkön hintataso
- järjestelmän vuosittaiset käyttökustannukset
- järjestelmän tekninen pitoaika

Herkkyysanalyysin lähtöarvot sekä niihin sovelletut prosentuaaliset muutokset on esitetty taulukossa 8. Arvot ovat pääasiassa eurosummia, mutta hybridilämmityksen vaikutus on mallinnettu sähkön hintatason kautta, ja tekninen pitoaika esitetään vuosina.

Taulukko 8: Herkkyysanalyysin parametrit ja arvot

	- 40 %	- 20 %	0 %	+ 20 %	+ 40 %
Investointi (€)	720 000	960 000	1 200 000	1 440 000	1 680 000
Spot-optimoinnin tuotto (€)	18 000	24 000	30 000	36 000	42 000
Reservituotto (€)	63 000	84 000	105 000	126 000	147 000
Sähkön hintataso (c/kWh)	3,12	4,16	5,2	6,24	7,28
Vuosikustannukset (€)	45 000	60 000	75 000	90 000	105 000
Pitoaika (v)	9	12	15	18	21

Yllä olevilla arvoilla lasketut nettonykyarvot on esitetty taulukossa 9, jossa investoinnin kannattavuuden herkkyys eri parametreilla käy selkeästi ilmi. Herkkyysanalyysin tulokset osoittavat, että investoinnin kannattavuus on kaiken herkin alkuinvestoinnin suuruudelle, reservimarkkinoiden tuotolle sekä tekniselle pitoajalle. Näiden parametrien muutokset vaikuttavat nettonykyarvoon selvästi enemmän kuin muiden tarkasteltujen muuttujien vaihtelut, ja alkuinvestoinnin kasvu sekä pitoajan lyhentyminen voivat laskea nettonykyarvon negatiiviseksi. Jos myös resilienssihyödyt huomioidaan, ja nettonykyarvoihin lisätään 240 000, yksikään muutoksista ei laske nettonykyarvoa negatiiviseksi.

Taulukko 9: Kannattavuuden herkkyysanalyysi

	- 40 %	- 20 %	0 %	+ 20 %	+ 40 %
Investointi (€)	900 000	670 000	440 000	210 000	-20 000
Spot-optimoinnin tuotto (€)	320 000	380 000	440 000	500 000	560 000
Reservituotto (€)	20 000	230 000	440 000	640 000	850 000
Sähkön hintataso (c/kWh)	702 000	570 000	440 000	310 000	180 000
Vuosikustannukset (€)	500 000	370 000	440 000	290 000	140 000
Pitoaika (v)	-60 000	210 000	440 000	640 000	810 000

Investointikustannusten vaikutus on muuttujista yksi merkittävimmistä. Alkuinvestoinnin kasvaessa 40 % peruslaskentaan nähden, investoinnin nettonykyarvo painuu lievästi negatiiviseksi, kun taas vastaava 40 % pienempi investointi nostaa nettonykyarvon noin 900 000 euroon. Investointikustannusten arvioiminen näin suuresti pieleen on kuitenkin epätodennäköistä, eikä muodosta suurta riskiä investointihankkeelle. Lisäksi mittakaavaedut, kuten useamman virtuaalivoimalan yhteishankinta, tarjoavat mahdollisuuden parantaa kannattavuutta laskemalla investointi- ja vuosikustannuksia. Havainto joka tapauksessa korostaa hankintavaiheen kustannushallinnan ja kilpailutuksen merkitystä koko investoinnin taloudellisen kannattavuuden kannalta.

Järjestelmän pitoajan vaikutus on myös huomattava. Tarkastelujakson lyhentyessä yhdeksään vuoteen investointi muodostuu selvästi kannattamattomaksi, kun taas pitoaikojen pidentyessä 18–21 vuoteen nettonykyarvo kasvaa merkittävästi. Tämä heijastaa erityisesti sitä, että investoinnin alkuvaiheen kustannukset ovat suuret ja taloudelliset hyödyt realisoituvat vasta useamman käyttövuoden aikana. Teknisen elinkaaren ja käytettävyyden varmistaminen on siten keskeinen kannattavuustekijä. On myös huomionarvoista, että teknistä pitoaikaa voidaan pidentää halvemmilla kustannuksilla, kuin alkuperäisillä kokonaisinvestoinnin kustannuksilla. Esimerkiksi hybridilämmitysjärjestelmässä yksittäisten komponenttien uusiminen tai kunnostaminen on tyypillisesti selvästi edullisempaa kuin koko järjestelmän korvaaminen uudella investoinnilla, mikä parantaa pitkän aikavälin kannattavuutta.

Reservimarkkinoiden hintatason vaikutus on analyysin voimakkain yksittäinen tulopuolen ajuri. Reservituottojen 40 % lasku laskee nettonykyarvon lähes nollatasolle, kun taas vastaava 40 % nousu kasvattaa nettonykyarvon noin 850 000 euroon. Tämä osoittaa, että virtuaalivoimalan kannattavuus nojaa vahvasti reservimarkkinoiden kehitykseen ja saavutettavaan joustokapasiteettiin. Samalla se tuo esiin investointiin liittyvän markkinariskin merkityksen erityisesti pitkällä aikavälillä. Toisin kuin investointikustannuksiin, reservimarkkinoiden hintatasoon on investointia suunniteltaessa vain rajalliset vaikutusmahdollisuudet. Käytännössä keskeisin riskienhallintakeino on monimarkkinaoptimointi, jossa reservimarkkinoille osallistumista ja eri reservituotteiden käyttöä optimoidaan jatkuvasti markkinahintojen ja hintaennusteiden perusteella.

Muiden tarkasteltujen muuttujien vaikutus investoinnin kannattavuuteen on selvästi maltillisempi. Spot-markkinoiden hintavaihtelulla on positiivinen, mutta suhteellisen rajallinen vaikutus nettonykyarvoon verrattuna reservituottoihin. Myös yleisen sähkön hintatason ja vuosittaisten käyttökustannusten muutokset vaikuttavat investoinnin kannattavuuteen odotetulla tavalla, mutta niiden vaikutus jää selvästi pienemmäksi kuin investointikustannusten, reservituottojen ja pitoajan muutokset.

Yhteenvetona herkkyysanalyysi osoittaa, että virtuaalivoimalainvestoinnin taloudellinen kannattavuus on erityisen herkkä alkuinvestoinnin suuruudelle, reservimarkkinoiden tulotasolle sekä järjestelmän tekniselle pitoajalle. Näihin liittyvät epävarmuudet muodostavat investoinnin keskeisimmän riskiprofiilin, kun taas sähkön hintatason, hintavaihtelun ja käyttökustannusten vaikutus jää selvästi toissijaisemmaksi. Tulokset korostavat markkinaehtoisten tulojen merkitystä sekä teknisen käytettävyyden ja elinkaaren hallinnan roolia pitkän aikavälin kannattavuudessa. Samalla on huomattava, että herkkyysanalyysi tarkastelee investointia ainoastaan taloudellisten mittareiden kautta eikä huomioi virtuaalivoimalan mahdollisia laadullisia hyötyjä, kuten päästövähennyksiä, huoltovarmuuden paranemista tai energiajärjestelmän joustavuuden lisääntymistä. Näitä vaikutuksia tarkastellaan seuraavassa alaluvussa.

5.4 Ympäristövaikutukset ja päästövähennykset

Vihreän siirtymän investointihankkeissa on tunnistettu, että perinteinen taloudelliseen kannattavuuteen keskittyvä arviointi ei aina kuvaa hankkeiden todellista

toteuttamiskelpoisuutta. Matinmikko et al. (2022) osoittavat, että feasibility study -kehikot painottuvat tyypillisesti taloudelliseen näkökulmaan, vaikka ympäristö- ja sosiaalisilla vaikutuksilla on merkittävä vaikutus hankkeiden kokonaistoteutettavuuteen. Tämän vuoksi kestävyyden kaikki eri ulottuvuudet tulisi huomioida, jotta investointien todelliset vaikutukset sekä hyödyt voidaan ymmärtää kokonaisvaltaisesti ja ottaa huomioon investointisuunnittelussa.

Kestävään arviointiin perustuvissa malleissa keskeistä ei ole pelkästään yksittäisen toimijan kassavirta, vaan myös investoinnin vaikutukset laajempaan ekosysteemiin, sähköjärjestelmään ja yhteiskuntaan. Matinmikko et al. (2022) korostavat, että erityisesti energiajärjestelmän murrokseen liittyvissä hankkeissa merkittävä osa hyödyistä syntyy järjestelmätasolla, eikä niitä voida sellaisenaan allokoida yksittäiselle investoijalle. Näiden vaikutusten sivuuttaminen voi johtaa investointien aliarviointiin ja heikentää vihreän siirtymän etenemistä.

Virtuaalivoimalakokonaisuuden ympäristövaikutuksia on juuri tästä syystä haastavaa arvottaa ja sisällyttää luvussa 5.2 käsiteltyyn perinteiseen kannattavuuslaskentaan, minkä vuoksi niitä tarkastellaan laadullisesti omassa alaluvussaan. Investointi tukee hiilineutraaliustavoitteiden saavuttamista sekä tuottaa ympäristöllistä ja yhteiskunnallista lisäarvoa, vaikka näitä vaikutuksia ei voida yksiselitteisesti kohdistaa taloudellisiksi kassavirroiksi.

Aiemman tutkimuksen perusteella sähkön markkinahinta ja sähköntuotannon päästöt eivät ole suorassa eikä yksiselitteisessä yhteydessä toisiinsa (Sridhar et al. 2022). Sähkön hinta määräytyy markkinoilla useiden samanaikaisten tekijöiden, kuten kysynnän, siirtokapasiteetin, tuotantorakenteen ja sääolosuhteiden perusteella, eikä korkea hinta automaattisesti tarkoita korkeapäästöistä tuotantoa. Tutkimuksen aineiston aikaväli on ollut kuitenkin 2018–2021, joten hinnan ja päästöjen välinen korrelaatio on voinut kasvaa tuulivoimatuotannon lisäännyttyä. Virtuaalivoimalan tai kiinteistöakun käytöstä spot-optimointiin ei kuitenkaan voida johtaa yksiselitteistä ja määrällisesti tarkkaa päästövähennystä pelkän rahallisen säästön perusteella.

Vaikka spot-optimoinnin suoraa päästövaikutusta ei voida laskea, energian jouston vaikutukset ilmenevät epäsuorasti sähköjärjestelmän toiminnan kautta. Spot-hintoja käytetään kulutuksen ohjaamiseen, jolloin hintoja nostamalla voidaan pyrkiä ohjaamaan kulutusta pois kyseiseltä tunnilta. Tällöin päästöintensiivisten tuotantomuotojen käynnistämistä voidaan välttää tai niiden käyttöä vähentää. Kulutusjousto ja energiavarastot lisäävät

sähköjärjestelmän joustavuutta, mikä helpottaa vaihtelevan uusiutuvan tuotannon integrointia järjestelmään. Joustava kysyntä ja varastointi vähentävät tarvetta mitoittaa järjestelmää huipputilanteiden mukaan sekä pienentävät uusiutuvan tuotannon alasajon tarvetta.

Lisäksi energiavarastot tukevat sähköverkon taajuudenhallintaa, mikä parantaa koko järjestelmän käyttövarmuutta ja tehokkuutta. Vakaa taajuus on edellytys sähköjärjestelmän turvalliselle toiminnalle, ja nopea joustokyky vähentää tarvetta ylläpitää erillistä, usein fossiilisiin polttoaineisiin perustuvaa säätökapasiteettia. Näin ollen spot-hintaohjattu optimointi sekä taajuustuenta eivät itsessään tuota välittömiä päästövähennyksiä, mutta ne tukevat sähkömarkkinoiden toimivuutta ja mahdollistavat suuremman uusiutuvan sähköntuotannon osuuden pitkällä aikavälillä.

Kiinteistöakustolla ja kysyntäjoustolla voidaan tuottaa muitakin merkittäviä hyötyjä koko sähköjärjestelmän toiminnalle. Energiavarastoja voidaan hyödyntää osana kantaverkon käyttöä ja pitkän aikavälin suunnittelua (Haakana et al. 2025). Erityisesti kulutushuippujen tasaaminen vähentää sähköverkon kuormitusta kriittisillä hetkillä, joka voi siirtää tai jopa poistaa tarvetta verkon vahvistamisinvestoinneille, mikä pienentää kustannuksia ja vähentää infrastruktuurin rakentamiseen liittyvää materiaalien ja luonnonvarojen käyttöä (Ribeiro & Salles 2023, 267).

Osana sähköjärjestelmän joustoratkaisujen kehitystä Suomessa on käynnistetty siirtojenhallinnan markkinapilotti FinFlex, jossa Fingrid ja Helen Sähköverkko hankkivat joustokapasiteettia ja joustoenergiaa markkinaehtoisesti. Markkinan keskeinen tavoite on ratkaista kantaverkon ja jakeluverkon pullonkauloja ilman välittömiä investointeja uusiin siirtolinjoihin tai verkon vahvistamiseen. Käytännössä siirtojenhallinnan markkina mahdollistaa sen, että verkonhaltijat voivat ostaa paikallisesti tai alueellisesti kohdennettua joustoa niiltä toimijoilta, joilla on ohjauksessaan joustokykyisiä resursseja, kuten kiinteistöakkuja, kulutusjoustoa tai hajautettua tuotantoa. Ympäristönäkökulmasta FinFlex-markkina tukee sähköjärjestelmän resurssitehokkuutta ja vähentää tarvetta materiaalivaltaisille verkkoinvestoinneille, joihin liittyy huomattavia elinkaaripäästöjä. (Fingrid 2024h)

Siirtojenhallinta jouston avulla mahdollistaa nykyisen infrastruktuurin tehokkaamman hyödyntämisen sekä helpottaa uusiutuvan sähköntuotannon liittämistä verkkoon alueilla, joilla siirtokapasiteetti on rajoittava tekijä. On kuitenkin huomioitava, että FinFlex on toistaiseksi kehityshanke ja pilotti, eikä markkinalta ole vielä saatavilla riittävää historiallista dataa

taloudellisten tuottojen luotettavaan arviointiin. Tästä syystä siirtojenhallinnan markkinaan osallistumisen potentiaalisia tuloja ei voida tässä työssä määrittää määrällisesti, eikä sitä ole huomioitu kannattavuuslaskennassa. FinFlex-pilotti kuitenkin osoitus siitä, että sähköverkko on kehittymässä myös tehonhallinnan suuntaan, joka voi avata virtuaalivoimalalle uusia tulovirtoja tulevaisuudessa.

Viimeinen keskeinen järjestelmätason hyöty liittyy sähkön markkinahintamekanismiin. Sähkömarkkinoilla hinta muodostuu marginaalikustannusperiaatteen mukaisesti siten, että markkinahinta määräytyy kalleimman kulloinkin tarvittavan tuotantoyksikön kustannusten perusteella. Tästä seuraa, että jo pienikin jousto kulutushuippujen aikana voi laskea markkinahintaa koko markkina-alueella, eikä ainoastaan niiden toimijoiden osalta, jotka osallistuvat joustoon suoraan. Aiempi tutkimus osoittaa, että kysyntäjouston avulla voidaan pienentää huippuhintojen esiintymistä ja alentaa keskimääräistä markkinahintaa, jolloin hintavaikutuksesta hyötyvät kaikki sähkön käyttäjät riippumatta siitä, osallistuvatko he joustoon vai eivät (Virasjoki et al. 2020). Yksittäisen virtuaalivoimalan tapauksessa vaikutus ei ole suuri, mutta usean voimalan ja aggregoinnin vaikutukset voivat olla merkittäviä.

Tätä markkinahinnan alenemisen kautta syntyvää vaikutusta voidaan tulkita sosiaalisena hyvinvointihyötynä, joka kasvattaa kuluttajan ylijäämää ja parantaa koko sähkömarkkinan kustannustehokasta toimintaa. Kyseinen hyöty jää kuitenkin investointihankkeen näkökulmasta ulkoisvaikutukseksi, sillä se ei realisoidu suoraan joustoresurssiin investoivan toimijan kassavirtoina eikä ole kohdistettavissa yksittäiselle toimijalle. Tästä huolimatta hintavaikutus on keskeinen osa joustoinvestointien yhteiskunnallista perusteltavuutta ja korostaa sitä, että vihreän siirtymän hankkeisiin liittyy merkittävä määrä epäsuoria ja järjestelmätason hyötyjä, joita perinteinen investointilaskenta ei kykene kattavasti huomioimaan.

6 Tulevaisuuden näkymät

Tässä luvussa käsitellään Suomen sähköverkon tulevaisuuden näkymiä, sekä miten eri kehityssuunnat voivat vaikuttaa virtuaalivoimalainvestoinnin kannattavuuteen. Tulevaisuuden näkymien analysoinnissa on hyödynnetty kirjallisuuden lisäksi myös sähkömarkkinoiden asiantuntijoiden haastatteluja. Haastattelujen perusteella Suomen sähköjärjestelmän tulevaisuutta leimaa samanaikaisesti sekä rakenteellinen vahvuus että kasvava epävarmuus. Yhteinen näkemys on, että markkinaehtoinen sähköjärjestelmä ja monipuolinen tuotantorakenne luovat hyvän pohjan sopeutua energiamurrokseen, mutta siirtymävaiheeseen liittyy merkittäviä haasteita.

6.1 Sähkömarkkina-analyysi

Suomen sähkömarkkinoiden keskeisiä vahvuuksia ovat monipuolinen tuotantorakenne sekä vahva markkinaehtoisuus. Monipuolinen tuotantopaletti parantaa järjestelmän resilienssiä ja vähentää yksittäisiin teknologioihin liittyviä riskejä (Mattila 2025). Markkinaehtoisuus puolestaan mahdollistaa sen, että joustoa ja investointeja ohjataan hintasignaalien kautta ilman laajamittaista keskitettyä ohjausta (Honkapuro 2025; Mattila 2025). Lamponen (2026) korostaa myös, että hintavaihtelun olemassaoloa voidaan pitää sähköjärjestelmän kannalta positiivisena ilmiönä, sillä se luo taloudelliset edellytykset kulutusjouston ja joustavan tuotannon toteuttamiselle. Virtuaalivoimalan ansaintalogiikka perustuu suoraan tähän volatiliteettiin sekä tuotannon ja kulutuksen ennustevirheisiin. Mitä suurempi ero joustamattoman kulutuksen ja vaihtelevan tuotannon välillä on, sitä arvokkaammaksi joustokapasiteetti muodostuu.

Merkittävänä heikkoutena Lamponen (2026) nostaa esiin siirtoverkon ja uusien liittymien rakentamisen hitauden. Pitkät luvitus- ja rakennusprosessit edellyttävät kantaverkon kehittämistä pitkälle tulevaisuuteen ulottuvien ennusteiden pohjalta, mikä lisää virhearvioiden riskiä. Suomen rajallinen rajasiirtokapasiteetti korostaa haastetta entisestään, ja maa toimii monilta osin sähkömarkkinoilla eräänlaisena saarekkeena (Honkapuro). Tämä lisää kotimaisen jouston ja kapasiteetin merkitystä erityisesti huippu- ja häiriötilanteissa sekä osaltaan voimistaa hintavaihtelua.

Haastattelujen perusteella tuulivoima tulee olemaan ensisijainen tuotantomuoto vastaamaan kasvavaan sähkön kysyntään (Honkapuro 2025; Lamponen 2026; Mattila 2025). Ydinvoimaa ei sähkömarkkinoilla yleisesti pidetä taloudellisesti kilpailukykyisenä ratkaisuna lyhyellä tai keskipitkällä aikavälillä reagoimaan kysynnän kasvuun. Lisäksi Olkiluoto 3 -hanke on osoittanut suurten yksiköiden rakennusajan pitkäksi, eikä pienydinvoiman voida odottaa saapuvan markkinoille merkittävässä mittakaavassa tämän virtuaalivoimalahankkeen pitoajan aikana.

Uusiutuvan tuotannon kasvu lisää sähköjärjestelmän sääriippuvuutta, mikä kasvattaa joustotarvetta entisestään sähkön kokonaiskulutuksen noustessa. Vaihtelevan tuotannon lisääntyminen luo ensin hintavaihtelua, mikä puolestaan synnyttää taloudelliset edellytykset ja kannustimet uusille joustoratkaisuille. (Honkapuro 2025; Lamponen 2026; Mattila 2025) Tämä kehityskulku on keskeinen virtuaalivoimaloiden kannattavuuden kannalta, sillä se muuttaa epävarmuuden kaupallisesti hyödynnettäväksi markkinaksi. Keskeisiä sähkönkulutuksen kasvua ajavia tekijöitä lähivuosina ovat erityisesti lämmöntuotannon sähköistyminen, datakeskukset sekä mahdollinen vetyteollisuus.

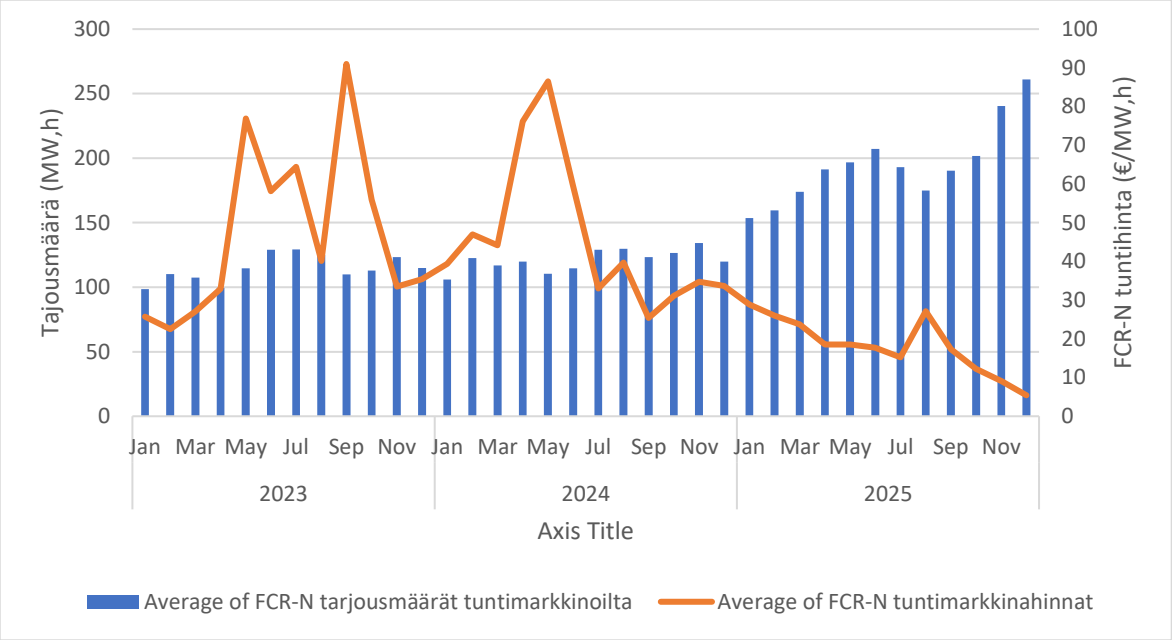
Sähkönkulutuksen ajureiden vaikutukset sähkömarkkinoille ja jouston tarpeelle ovat kuitenkin epäselviä. Esimerkiksi lämmityksen sähköistyminen on jo luonteeltaan itsessään joustavaa, sillä lämpövarastojen yleistyminen mahdollistaa kulutuksen siirtämisen ajallisesti. Kaukolämpöyhtiöt investoivat suuriin sähkökattiloihin ja lämpövarastoihin, jolloin yhtiöt kuluttavat sähköä halpojen tuntien aikana ja leikkaavat matalimpia spot-hintoja. Tämä kehitys puolestaan vähentää hintavaihtelun ja tasevirheen määrää sähköverkossa. Jos kasvavaan tarpeeseen kuitenkin tuotetaan sähkö uusiutuvin menetelmin, se osaltaan lisää tarvetta joustoille, ja kokonaisvaikutus jää epäselväksi.

Vedyn yleistyminen nähdään yhtenä keskipitkän aikavälin suurimmista epävarmuustekijöistä sähköjärjestelmälle, sillä se voisi kasvattaa Suomen sähkönkulutusta huomattavasti. (Honkapuro 2025). Nykyisillä markkinaehdoilla vedyn tuotanto ei kuitenkaan ole laajassa mittakaavassa taloudellisesti kannattavaa, eikä sen vaikutus sähkömarkkinoiden hintavolatiliteettiin ole yksiselitteinen. Toisaalta elektrolyysi voidaan ajoittaa edullisille sähkötunneille ja vetyä voidaan varastoida, mikä hillitsee lyhyen aikavälin hintavaihtelua. Toisaalta taas vetyinfrastruktuurin korkeat pääomakustannukset ja investointiriskit voivat edellyttää korkeaa käyttöastetta ja tasaista ympärivuotista tuotantoa, mikä heikentäisi vedyn roolia joustavana sähkönkuluttajana. Epäsuora sähköistys nähdään kuitenkin kriittisenä tekijänä

hiilineutraaliustavoitteiden saavuttamisessa (Luderer et al. 2022), jolloin vetytalouden edistämiseen liittyy myös strategisia ja poliittisia tavoitteita.

Samoin datakeskusten rooli joustomarkkinalla on vielä epäselvä. Datakeskusten laskentatehon säätelyn on tutkittu olevan teknisesti mahdollista (Alaperä, Honkapuro & Paananen 2018), jolloin datakeskukset voivat säätää laskentatehoaan eri keskusten välillä markkinasignaalien mukaisesti. Laskentatehon siirron toteuttaminen dynaamisesti eri keskusten välillä on kuitenkin teknisesti haastavaa, eikä toimijoiden kiinnostuksesta asiaa kohtaan olla varmoja. Merkittävämpi potentiaali voi piillä datakeskusten UPS-akustoissa, joilla keskukset turvaavat toimintaansa. Mikäli varavoimajärjestelmät ylimitoitetaan, niiden kapasiteettia voidaan tarjota reservimarkkinoille. Tämä lisäisi kilpailua reservimarkkinoilla merkittävästi, mutta on epävarmaa, näkevätkö datakeskustoimijat tämän ydinliiketoimintansa kannalta hyväksyttävänä riskinä.

Kilpailu joustomarkkinoilla on jo muutenkin kasvussa energiavarastojen ja tuulivoiman säädettävyyden kehittymisen myötä, ja se näkyy myös reservien hintatasossa. Erityisesti energiavarastoinvestointien lisääntyminen sekä erilaisten kulutusjoustoratkaisujen kehittäminen ovat kasvattaneet tarjolla olevan reservikapasiteetin määrää. Samanaikaisesti myös uusiutuvan tuotannon säätömahdollisuuksia on kehitetty, ja esimerkiksi tuulivoimaa hyödynnetään jo aFRR-alassäädössä (Fingrid 2017a). Kuvaajassa 29 on esitetty FCR-N reservituotteen tuntimarkkinoiden keskimääräiset tarjousmäärät, sekä sen vaikutus keskimääräisiin tuntihintoihin. Kuvaajasta on selvästi nähtävissä kysynnän ja tarjonnan lait, ja vuoden 2025 aikainen tarjousmäärien nousu on johtanut hintatason laskuun.



Kuva 29: FCR-N tuotteen tarjousmäärät sekä hintataso

FCR-N markkina on yleisin markkina, jolle energiavarastoilla osallistutaan, jolloin sen tarjontaan kohdistuu suurin lisäys uusien akkuinvestointien myötä. Muiden reservituotteiden osalta tilanne ei ole yhtä korostunut, ja hintatasot ovat säilyneet korkeampina. Lisäksi on huomioitava, että yleisestä hintatason laskusta huolimatta yksittäisiä hintapiikkejä voi esiintyä, joka puolestaan korostaa monimarkkinaoptimointia sekä hintatasojen ennustamisen onnistumista. Strategisesti tämä siirtää painopistettä yksittäisen reservituotteen optimoinnista kokonaisvaltaiseen ohjaukseen, jossa huomioidaan kaikki vaihtoehtoiset markkinat.

Tulevaisuudessa reservimarkkinoiden lisäksi myös sähköverkon pullonkaulat ja alueellinen hinnanmuodostus korostuvat, kun uusiutuva tuotanto lisääntyy entisestään. Etelä-Suomessa sähkön ja lämmön yhteistuotantolaitokset korvataan sähkökattiloilla, eli tuotannon tilalle tulee lisää kulutusta. Tähän kulutuksen vastataan rakentamalla tuulivoimaa, jota rakennetaan lähtökohtaisesti Pohjois-Suomeen. Tämä lisää pohjois-eteläsuuntaisten siirtolinjojen tarvetta ja kasvattaa myös tehonhallinnan merkitystä. Yhden hinta-alueen ylläpitäminen vaatii siis jatkossa siirtojenhallinnan markkinoiden, kuten FinFlexin, laajentamista. Yhdessä tehoperusteisten hinnoittelumallien kanssa tällaiset markkinat lisäävät ansaintamahdollisuuksia kulutusjoustolle.

Edellä kuvatut kehitystrendit muokkaavat virtuaalivoimalan toimintaympäristöä usean samanaikaisen mekanismin kautta. Taulukkoon 10 on koottu keskeiset muutosvoimat sekä niiden vaikutukset sähkön kysyntään, hintavaihteluun ja jouston tarpeeseen. Varsinkin yhdessä

tarkasteltuna trendit eivät yksiselitteisesti lisää tai vähennä virtuaalivoimalan markkinapotentiaalia, ja kokonaisvaikutukset jäävät epävarmoiksi.

Taulukko 10: Sähkömarkkinoiden muutosvoimat ja niiden vaikutukset

Kehitystrendi	**Vaikutus sähkön kysyntään**	**Vaikutus hintavaihteluun**	**Vaikutus jouston tarpeeseen**	**Merkitys virtuaalivoimalalle**
Lämmityksen sähköistyminen	Lisää kysyntää	Vähentää	Vähentää lievästi	Neutraali tai lievästi negatiivinen
Vetyteollisuus	Lisää kysyntää	Vähentää pitkällä aikavälillä	Epävarma	Epävarma
Datakeskusten yleistyminen	Lisää kysyntää	Epävarma, mutta luultavasti neutraali	Saattaa lisätä, jos kulutus katetaan tuulivoimalla	Neutraali tai positiivinen
Tuulivoiman lisääntyminen	Lisää tarjontaa	Lisää	Lisää	Suuresti positiivinen
Siirtoverkon rajoitteet	Ei suoraa vaikutusta	Ei suoraa vaikutusta	Lisää huippu- ja häiriötilanteissa	Positiivinen
Energiavarastojen yleistyminen	Ei suoraa vaikutusta	Vähentää	Vähentää huomattavasti	Negatiivinen

Taulukosta voidaan tehdä kaksi keskeistä johtopäätöstä. Ensinnäkin suurin yksittäinen virtuaalivoimaloita tukeva tekijä on sääriippuvan tuotannon kasvu. Toiseksi jouston arvo ei määräydy pelkästään sähkönkysynnän kasvun perusteella, vaan ennen kaikkea sen mukaan, kuinka ennustettavaa ja ajallisesti tasaista uusi kulutus on. Tasaisen kysynnän kasvu pienentää lyhyen aikavälin volatiliteettia, kun taas sääriippuvainen tuotanto kasvattaa sitä.

Hintavaihtelu ei kuitenkaan ilmene yhtenäisenä ilmiönä, vaan jakautuu useille markkinapaikoille. Spot-hinnat perustuvat lähtökohtaisesti uusiutuvien energiamuotojen ennusteisiin, jonka jälkeen päivän sisäisillä markkinoilla hinnat muuttuvat jatkuvasti ennusteiden tarkentuessa. Reserveillä tasataan se tasevirhe, jota sähköntoimittajat eivät päivän sisäisistä markkinoista huolimatta onnistuneet tasaamaan. Reservituotteiden hinnat taas tulevat vaihtelemaan tasevirheen suuruuden sekä reservitarjonnan mukaan. Tulevat rakenteelliset muutokset eivät siis välttämättä poista volatiliteettia, vaan siirtävät sitä markkinatasolta toiselle.

Samalla sähköverkkoa on systemaattisesti muutettu dynaamisempaan suuntaan, esimerkiksi siirtymällä sähkömarkkinoilla 15 minuutin resoluutioon on. Aikayksikön lyhentyminen on nelinkertaistanut kaupankäyntijaksojen määrän ja lisännyt operatiivisen optimoinnin vaatimuksia. Samalla markkinat ovat siirtyneet kohti automaatiota, ja tekoälypohjaisia optimointipalveluita hyödynnetään jo reservi- ja tasehallinnassa. Algoritmikaupankäynnin vaikutukset sähkömarkkinoilla ovat vielä epäselvät, mutta havainnot finanssimarkkinoilta tarjoavat viitekehyksen kehityksen arviointiin. Finanssimarkkinoilla tekoälyalgoritmeja on jo jonkin käytetty aikaa kaupankäynnin tukena, ja algoritmien ensisijaiset hyödyt ovat epälineaaristen trendien löytäminen, nopea ostoväli sekä inhimillisten vääristymien poistaminen (Keswani, Agrawal & Sharma 2025).

Algoritmien seurauksena kehittyvillä markkinoilla kaupankäynti on nopeutunut ja kokonaisvolatiliteetti on laskenut. Vakauttava vaikutus perustuu inhimillisen tekijän minimoimiseen, jolloin automaatio vähentää ylireagointia ja hillitsee laumakäyttäytymistä. (Yang et al. 2025) Sähkömarkkinoilla tulokset ovat sovellettavissa erityisesti intraday-markkinoilla, jossa kaupankäyntinopeus on kriittinen tekijä. Virtuaalivoimalan kannalta tämä kehitys voi tarkoittaa pienempiä riskejä, mutta toisaalta se voi myös vähentää äärimmäisiä volatiliteettipiikkejä, joihin voimalan ansiovirrat perustuvat. Yang et al. (2025) tutkimus kuitenkin huomauttaa vaikutuksen olevan herkkä markkinan laskusuhdanteelle, mikä sähkömarkkinoiden kontekstissa voi tarkoittaa vakauttavan vaikutuksen heikkenemistä häiriötilanteiden tai energiapulan aikana.

Algoritmisen kaupankäynnin yleistyminen voi siis johtaa sähkömarkkinoiden tehostumiseen, jossa inhimillisistä virheistä ja hitaudesta johtuvat tuotot katoavat. Kilpailuetu ei tällöin perustu pelkästään fyysiseen kapasiteettiin, vaan kykyyn käsitellä dataa, ennustaa hintasignaaleja ja optimoida osallistuminen eri markkinoille reaaliaikaisesti. Markkinat voivat polarisoitua siten, että suurin arvonluonti keskittyy toimijoille, joilla on edistyneimmät analytiikka- ja optimointikyvykkyydet. Kokonaisuutena sähkömarkkinoiden kannalta kehitys on positiivinen, sillä se mahdollistaa mahdollisimman kustannustehokkaan toiminnan. Virtuaalivoimalainvestoinnin kannalta kehitys voi kuitenkin syödä markkinatuottoja, jos markkinaosallistumista ei saada optimoitua.

Yhteenvetona Suomen sähkömarkkinoiden kehitys lähtökohtaisesti tukee virtuaalivoimaloiden toimintaa, sillä järjestelmän markkinaehtoisuus, kasvava uusiutuvan tuotannon osuus sekä rajallinen siirtokapasiteetti ylläpitävät hintavaihtelua ja tase-epätasapainoja. Nämä

tekijät muodostavat perustan joustokapasiteetin taloudelliselle arvolle. Samalla kysynnän kasvuun liittyy osittain epävarmoja tasoittavia tekijöitä, kuten lämpökuormien ja teollisten prosessien potentiaalinen joustavuus. Jos kulutuksen kasvuun kuitenkin vastataan lisäämällä uusiutuvaa tuotantoa, kokonaisvaikutusta jouston tarpeeseen on vaikea arvioida. Seuraavassa alaluvussa käsitellään virtuaalivoimalan kannattavuutta eri sähkömarkkinoiden skenaarioissa, jotta voidaan arvioida, miten kysynnän ja joustotarpeen erilaiset yhdistelmät vaikuttavat investoinnin kannattavuuteen.

6.2 Skenaarioanalyysi

Skenaarioanalyysin tavoitteena on arvioida virtuaalivoimalan taloudellista suoriutumista erilaisissa vaihtoehtoisissa tulevaisuuden toimintaympäristöissä. Koska sähkömarkkinoiden kehitykseen liittyy merkittäviä epävarmuustekijöitä, yksittäisten parametrien herkkyystarkastelu ei ole riittävä kuvaamaan investoinnin kokonaisriskiprofiilia. Skenaarioanalyysi mahdollistaa useiden markkinamuuttujien yhtäaikaisen tarkastelun keskenään johdonmukaisina kehityspolkuina. Mahdollisia muutosvoimia on koottu yhteen ja niiden pohjalta on muodostettu neljä skenaariota, joissa keskeisinä muuttujina ovat sähkön kokonaiskulutuksen kasvu sekä sähköjärjestelmän sisäinen joustotarve.

Nämä kaksi ulottuvuutta muodostavat nelikentän, joka on esitetty taulukossa 11. Skenaariot on nimetty niiden hallitsevien piirteiden mukaan, ja ne heijastavat erilaisia teknologisia ja markkinaehtoisia kehityskulkuja. Nelikenttä ja niiden mahdolliset muutosajurit pohjautuvat Fingridin sähköjärjestelmävisioon vuodelle 2040 (Fingrid 2025a). Taulukossa esitetyt ilmiöt eivät ole ennusteita, vaan esimerkkejä kehityskuluista, jotka voivat johtaa kyseiseen markkinarakenteeseen.

Taulukko 11: Sähköjärjestelmän neljä skenaariota (mukaillen Fingrid 2025a)

	Suuri joustotarve	Pieni joustotarve
Suuri kulutus	**Epäsynkroninen kasvu:** Liikenteen nopea sähköistyminen, datakeskukset joustamattomia, muu teollisuuden sähköistyminen, aurinko- ja tuulivoiman lisääntyminen, korkea reservitarve	**Integroitu jousto:** Datakeskukset joustavia, lämmöntuoton täysi sähköistyminen ja joustavat lämpökattilat, liikenteen lataus joustavaa (V2G), vetyteollisuus ja vetyvarastot
Pieni kulutus	**Sääriippuvainen ylitarjonta:** Maa- ja merituulivoiman voimakas lisääntyminen suhteessa hitaaseen kysynnän kasvuun.	**Vakaa peruskuorma:** Ydinvoiman lisääntyminen, sähköauton akkujen uusiokäyttö, akkuvarastoinvestointien ja muiden joustojen huomattava kasvu

Skenaarioiden vaikutus virtuaalivoimalan kannattavuuteen mallinnetaan kolmen keskeisen markkinaparametrin kautta:

- sähkön keskimääräinen hintataso
- sähkön hinnan vaihtelu (volatiliteetti)
- reservituotteiden hintataso

Mallissa volatiliteetin muutos toteutetaan muuttamalla suoraan spot-optimoinnin vuosituottoa, joka perustuu tuntihintojen erotuksiin. Vastaavasti reservimarkkinoiden kehitys mallinnetaan muuttamalla reservitoiminnasta saatavaa vuosituottoa. Kullekin skenaariolle määritetään näille parametreille suhteelliset muutokset nykyiseen tasoon verrattuna. Oletukset on johdettu skenaarioiden rakenteellisesta logiikasta, eli suuri joustotarve tukee reservihintoja, suuri sääriippuvainen tuotanto kasvattaa hintavaihtelua ja korkea kulutustaso nostaa keskimääräistä hintatasoa. Skenaarioissa käytetyt suhteelliset muutokset on esitetty taulukossa 12.

Taulukko 12: Skenaarioiden parametrien muutokset

	Suuri joustotarve	Pieni joustotarve
Suuri kulutus	**Epäsynkroninen kasvu** • Hintataso: + 20 % • Hintavaihtelu: + 25 % • Reservituotto: + 40 %	**Integroitu jousto:** • Hintataso: + 15 % • Hintavaihtelu: + 10 % • Reservituotto: - 20 %
Pieni kulutus	**Sääriippuvainen ylitarjonta:** • Hintataso: - 20 % • Hintavaihtelu: + 40 % • Reservituotto: + 25 %	**Vakaa peruskuorma:** • Hintataso: - 10 % • Hintavaihtelu: - 20 % • Reservituotto: - 40 %

Parametrimuutokset konkretisoituvat investoinnin taloudellisiksi vaikutuksiksi kassavirtalaskennan kautta. Kussakin skenaariossa peruslaskelman vuotuisia tuotto- ja kustannuseriä on oikaistu taulukossa 12 esitettyjen suhteellisten muutosten mukaisesti, minkä jälkeen nettonykyarvo on laskettu samoilla investointi- ja diskonttausoletuksilla kuin perusskenaariossa. Näin skenaariot ovat keskenään vertailukelpoisia ja erot johtuvat ainoastaan markkinaympäristön muutoksista. Investoinnin nettonykyarvot eri skenaarioissa on esitetty taulukossa 13.

Taulukko 13: Investoinnin nettonykyarvot eri skenaarioissa

	Suuri joustotarve	Pieni joustotarve
Suuri kulutus	800 000	160 000
Pieni kulutus	950 000	30 000

Skenaarioanalyysin perusteella investointi on selvästi kannattavin ympäristöissä, joissa sähköjärjestelmän joustotarve on korkea. Erityisesti sääriippuvaisen ylitarjonnan skenaariossa korkea hintavaihtelu ja reservimarkkinoiden kysyntä tukevat virtuaalivoimalan ansaintalogiikkaa, vaikka keskimääräinen hintataso on matala. Pienen joustotarpeen skenaarioissa nettonykyarvo jää selvästi alhaisemmaksi. Tällöin markkina tasapainottuu laajamittaisen joustokapasiteetin ansiosta, mikä pienentää sekä hintavaihtelua että reservihintoja. Virtuaalivoimalan tuottopotentiaali heikkenee erityisesti silloin, kun reservimarkkinoiden hintataso laskee merkittävästi.

Reservituottojen pienentyminen vaikuttaa erityisesti energiavaraston kannattavuuteen sillä, nykyisessä markkinaympäristössä akuston taloudellinen arvo perustuu pääosin reservimarkkinoilta saatavaan tuottoon. Mikäli reservihinnat laskevat kilpailun kiristyessä tai järjestelmän vakautuessa, akuston tuottopotentiaali heikkenee nopeasti. Tällöin sähkövaraston lisääminen virtuaalivoimalaan pienentää kokonaisinvestoinnin nettonykyarvoa.

Myöskään akuston resilienssihyödyt eivät tässä mallissa kompensoi heikentynyttä markkinatuottoa, sillä varautumishyödyt on arvotettu lämmityksen varmentamisen kautta. Sähkövaraston toimitusvarmuusarvo jää siten laadulliseksi eikä näy kassavirroissa. Näin ollen alhaisen joustotarpeen skenaarioissa akusto kasvattaa investoinnin taloudellista riskiä. Skenaarioanalyysissa ei kuitenkaan huomioida, että tulevaisuudessa akuston arvonmuodostus voi monipuolistua. Tehonhallintaan liittyvät tariffit sekä sähkön hankinnan kustannusten tasaaminen voivat jatkossa muodostaa uusia tulovirtoja, jotka eivät näy skenaarioanalyysissä.

Kaikissa tarkastelluissa skenaarioissa kokonaisinvestoinnin nettonykyarvo on kuitenkin positiivinen. Kun lisäksi huomioidaan resilienssihyötyjen arvioitu arvo (240 000 €), investoinnin kannattavuus vahvistuu edelleen. Negatiivinen nettonykyarvo edellyttäisi käytännössä markkinarakennetta, jossa sekä hintavaihtelu että reservituotot heikkenisivät samanaikaisesti ilman, että keskimääräinen hintataso laskisi vastaavasti. Tällainen kehitys edellyttäisi sähköjärjestelmän laajamittaista vakautumista ja kilpailun voimakasta kiristymistä joustomarkkinoilla. Vaikka kilpailu reservimarkkinoilla on selvässä nousussa, ei merkkejä vakaasta sähköntuotannosta ole havaittavissa.

Tulosten perusteella investoinnin keskeisin riski ei ole sähkön hintatason muutos, vaan markkinoiden rakenteellinen vakautuminen ja kilpailevien joustomuotojen nopea yleistyminen. Nykyiset energiapoliittiset tavoitteet, uusiutuvan tuotannon kasvu ja kulutuksen sähköistyminen viittaavat kuitenkin pikemminkin järjestelmän joustotarpeen kasvuun kuin sen merkittävään vähenemiseen. Tämän perusteella virtuaalivoimalan riskiprofiili näyttäytyy hallittuna ja investointi säilyttää tuottopotentiaalinsa useissa vaihtoehtoisissa tulevaisuuskuvissa.

6.3 Riskienhallinta

Osana virtuaalivoimalainvestoinnin arviointia on keskeistä tunnistaa hankkeen kannattavuuteen ja tekniseen toteutettavuuteen liittyvät epävarmuustekijät. Tämänhetkisessä markkinatilanteessa merkittävin yksittäinen riski liittyy joustoresurssien kilpailun kiristymiseen ja siitä seuraavaan reservimarkkinoiden saturoitumiseen. Virtuaalivoimalan markkinaehtoinen kannattavuus vaarantuisi skenaariossa, jossa sähkön hintataso säilyisi tasaisen korkeana, mutta hintavaihtelu pienenisi ja säätökykyisen kapasiteetin tarjonta ylittäisi kysynnän jatkuvasti. Nykymarkkinassa tällainen kehityskulku näyttäytyy kuitenkin epätodennäköisenä, sillä kasvavaan kysyntään vastataan ensisijaisesti tuulivoimalla, mikä lisää tuotannon sääriippuvuutta ja sitä kautta myös hintavaihtelua.

Toisaalta on huomioitava, että tarjousten määrät tietyillä reservituotteilla ovat kasvaneet nopeampaa tahtia kuin sääriippuvainen tuotanto on lisääntynyt. Ilman merkittävää sähkönkulutuksen lisääntymistä uudet energiavarasto- ja kysyntäjoustohankkeet voivat ajaa reservihintoja alas. Tämä kehitys asettaa korkeita vaatimuksia käytettäville ennustemalleille ja markkinaosallistumisen strategioille. Erityisesti akustojen kannattavuus nojaa vahvasti reservituottoihin, jotka muodostavat kriittisen osan hankkeen tulovirroista. Hyötyjen maksimoiminen edellyttääkin saumatonta monimarkkinaoptimointia, jossa kapasiteettia jaetaan dynaamisesti eri markkinapaikkojen välillä. Mikäli ennustemallit eivät kykene reagoimaan markkinarakenteen muutoksiin tai hintapiikkien siirtymiseen, investoinnin takaisinmaksuaika pitenee merkittävästi.

Markkinariskien ohella energiapoliittisilla päätöksillä on huomattava painoarvo, mikä korostui myös kaikissa asiantuntijahaastatteluissa. Poliittinen ohjaus ei vaikuta ainoastaan sähkön hintatasoon, vaan se määrittelee myös laajemmat strategiset tavoitteet, kuten kansallisen omavaraisuuden ja huoltovarmuuden. Schroderus et al. (2025) tutkimus osoittaa, että tuntitasolla Suomi saavuttaa sähköomavaraisuuden vain noin 39 prosenttia ajasta. Tämän parantamiseksi tutkimuksessa korostetaan tarvetta uusiutuvan tuotannon, kysyntäjouston ja energian varastointiratkaisujen samanaikaiselle kehittämiselle. Koska omavaraisuusasteen nostaminen täysin markkinaehtoisesti on hidasta, voi valtio puuttua markkinamekanismeihin tukimalleilla tai muulla sääntelyllä.

Energiapoliittinen epävarmuus kohdistuu erityisesti investointiympäristön strategiseen ohjaukseen. Keskeinen kysymys on, painotetaanko tulevaisuudessa ensisijaisesti hajautettua

joustokapasiteettia vai suuria perusvoimainvestointeja, kuten perinteistä ydinvoimaa. Virtuaalivoimala voi kuitenkin joustavuutensa ansiosta hyödyntää lähes kaikkia markkinamuutoksia, eivätkä yksittäiset muutokset aiheuta suurta riskiä. Virtuaalivoimalan kannalta merkittävin poliittinen riski liittyykin sääntely-ympäristön ennakoimattomuuteen, jossa poliittisten päätösten epävarmuus hankaloittaa markkinakäyttäytymisen ennustamista.

Itse reservituotteiden tekniset vaatimukset ja markkinarakenteet muuttuvat yleensä hitaasti ja iteratiivisesti. Fingridin johtamat muutosehdotukset kantaverkon tarpeisiin kulkevat aina Energiaviraston hyväksynnän kautta. Tämä sääntelyllinen prosessi on läpinäkyvä ja tarjoaa samalla myös sijoittajille suojan äkillisiä markkinamuutoksia vastaan. (Lamponen 2026; Mattila 2025) Muutoksiin voidaan siis varautua hyvissä ajoin, eivätkä ne muodosta riskiä virtuaalivoimalainvestoinnille. Lisäksi viimeaikaiset muutokset ovat ohjanneet sähkömarkkinoita systemaattisesti kohti dynaamisempaa suuntaa, joka puolestaan vain tukee virtuaalivoimalan mahdollisuuksia markkinoilla.

Teknisestä näkökulmasta tarkasteltuna merkittävin riski liittyy järjestelmäintegraatioon. Virtuaalivoimala ei ole yksittäinen laite, vaan kokonaisuus, joka koostuu erikseen hankittavista komponenteista: akustosta, hybridilämmityksestä, rakennusautomaatiosta ja reservioperointia ohjaavasta järjestelmästä. Kriittinen riskitekijä on näiden järjestelmien yhteensopimattomuus ja ohjauslogiikoiden integraation haasteellisuus. Mikäli jokainen komponentti toimii oman optimointilogiikkansa mukaisesti ilman yhtenäistä koordinaatiota, seurauksena on koko kapasiteetin heikko hyödyntäminen, menetettyjä reservitunteja, teknisiä käyttörajoitteita sekä kiinteistön sisäisen energiatehokkuuden heikkeneminen.

Riskienhallinnan näkökulmasta onkin suositeltavaa välttää teknologista lukkiutumista ja jättää talotekniset laitteet avoimeksi eri operoijien ohjaukselle. Samalla avoimet rajapinnat mahdollistavat mahdollisimman helpon integraation laitteiden välillä. Yhteen operoijaan sitoutuminen on riski, sillä se poistaa kilpailuttamisen mahdollisuuden ja sitoo kiinteistön vain yhden palveluntarjoajan algoritmien suorituskykyyn. Operoijan valinnassa on painotettava kyvykkyyttä monimarkkinaoptimointiin, mikä on myös haastateltujen asiantuntijoiden mukaan keskeisin tekijä epävarman markkinatilanteen hallinnassa (Honkapuro 2025; Lamponen 2026; Mattila 2025).

Teknisten riskien hallinnassa on huomioitava myös kyberturvallisuus. Koska virtuaalivoimala perustuu kiinteistön ja ulkopuolisen operoijan väliseen tiedonsiirtoon, järjestelmän

rajapinnat muodostavat teoreettisen tietoturvariskin. Riskiä voidaan kuitenkin merkittävästi pienentää noudattamalla tietojen minimoinnin periaatetta, jolloin operointijärjestelmälle välitetään ainoastaan kriittinen tieto saatavilla olevasta joustokapasiteetista. Kun operoijan suuntaan kommunikoidaan vain aggregoitu joustomäärä ilman yksityiskohtaista tietoa siitä, mitkä yksittäiset laitteet tai prosessit kulutusta kulloinkin säätelevät, säilytetään kiinteistön sisäisen toiminnan anonymiteetti. Tämä lähestymistapa suojaa kiinteistön käyttäjien yksityisyyttä ja estää ulkopuolisia tahoja päättelemästä rakennuksen käyttöasteeseen tai teknisiin prosesseihin liittyvää arkaluonteista tietoa.

Yhteenvetona virtuaalivoimalainvestoinnin riskiprofiili voidaan jakaa kahteen osaan. Lyhyellä aikavälillä suurimmat epävarmuudet liittyvät tekniseen integraatioon ja operoijan valintaan, kun taas pidemmällä aikavälillä korostuvat reservimarkkinoiden hintatason kehitys ja energiapoliittiset linjaukset. Riski markkinoiden saturoitumisesta on todellinen, mutta sitä voidaan hallita hajauttamalla osallistumista useille eri markkinapaikoille ja suosimalla teknologisesti avoimia ratkaisuja, jotka mahdollistavat joustavan reagoinnin markkinamuutoksiin. Yksi keino minimoida markkinariskit, on rajata investointi pelkkään hybridilämmitykseen. Herkkyys- sekä skenaarioanalyysin perusteella sähköakusto on huomattavasti alttiimpi reservimarkkinoiden saturoitumiselle, kun taas hybridilämmityksen ansaintalogiikka perustuu sähkön ja kaukolämmön väliseen hintaeroon. Lisäksi suurin virtuaalivoimalan resiliensihyöty, eli lämmönsaannin turvaaminen, on saavutettavissa pelkällä hybridilämmityksellä.

Akuston lisääminen tarjoaa kiinteistölle kuitenkin monipuolisempaa joustoa ja valmistelee kiinteistön paremmin tulevaisuuden markkinakehityksiä, kuten tehoperusteisen hinnoittelun roolin kasvua varten. Lisäksi tulevat muutokset Senaatti-kiinteistöjen tasehallintaan tukevat akuston lisäämistä, sillä sen avulla voidaan pienentää myös tasehallinnasta koituvia kuluja. Täysimittainen virtuaalivoimalainvestointi sisältäen akuston onkin perusteltu valinta kiinteistön joustomahdollisuuksien maksimoimiseksi myös tulevaisuuden markkinamuutosten varalta.

7 Johtopäätökset

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli arvioida virtuaalivoimalakokonaisuuden taloudellisia ja strategisia edellytyksiä julkisessa kiinteistökannassa sekä tarkastella investoinnin resilienssivaikutuksia ja markkinariskien hallintaa energiamurroksen kontekstissa. Tutkimus vastasi asetettuihin tavoitteisiin kokonaisvaltaisesti yhdistämällä markkina-analyysin, kannattavuuslaskennan, herkkyys- ja skenaarioanalyysin sekä asiantuntijahaastattelut yhdeksi kokonaisuudeksi. Tässä luvussa työn tuloksia peilataan asetettuihin tutkimuskysymyksiin sekä käsitellään työn rajoitteet sekä jatkotutkimustarpeet.

7.1 Työn tulokset

Jotta työssä saatuja havaintoja voidaan tarkastella suhteessa tutkimuksen alkuperäiseen rajaukseen ja tavoitteisiin, on tuloksia syytä peilata suoraan asetettuihin tutkimuskysymyksiin. Seuraavaksi esitetään tiivistetyt vastaukset tutkimuksen kolmeen pääkysymykseen, jotka ohjasivat analyysia taloudellisuuden, resilienssin ja markkinamuutoksen näkökulmista:

1. *Millä edellytyksillä virtuaalivoimalan eri osien toteutus on taloudellisesti kannattavaa kiinteistötasolla?*

Taloudellisten edellytysten osalta tutkimus osoittaa, että virtuaalivoimalan eri komponenttien taloudelliset edellytykset poikkeavat toisistaan selvästi. Hybridilämmitys on kannattava ratkaisu tilanteissa, joissa sähkön ja kaukolämmön välinen hintasuhde mahdollistaa lämmöntuotannon siirtämisen sähköpohjaiseksi ilman, että kokonaiskustannus kasvaa. Nykyisillä hintatasoilla hybridilämmitys toimii investoinnin matalariskisenä perustana, koska sen tuotto ei ole riippuvainen reservimarkkinoista. Lämpöpumpun hyvän COP-arvon ansiosta sähkön hinnan tulisi nousta vielä vuoden 2022 energiakriisiä korkeammalle tasolle, jotta investointi olisi kannattamaton.

Älykäs energianohjaus on taloudellisesti perusteltu, mikäli kiinteistössä on riittävästi ohjattavaa kuormaa ja mahdollisuus hyödyntää tuntihintavaihtelua. Sen kannattavuus perustuu energiankäytön lyhyen aikavälin optimointiin, eikä se edellytä merkittävää markkinariskiä. Järjestelmän investointi- ja käyttökustannukset ovat pienet, eikä sähkönhintojen lyhyen

aikavälin vaihtelu ole poistumassa. Päinvastoin viimeaikaiset muutokset ovat ohjanneet sähköverkkoa dynaamisempaan suuntaan.

Kiinteistöakuston taloudellinen kannattavuus sen sijaan edellyttää reservimarkkinoilta saatavia tuloja. Ilman markkinaosallistumista akuston investointi ei täytä perinteisiä nettonykyarvokriteerejä, jolloin reservimarkkinoiden hintataso, ennusteet ja monimarkkinaoptimoinnin onnistuminen ovat keskeisiä tekijöitä takaamaan akuston kannattavuus. Skenaario- ja herkkyysanalyysit kuitenkin osoittavat, että koko virtuaalivoimalakokonaisuuden nettonykyarvo säilyy positiivisena useissa vaihtoehtoisissa markkinaympäristöissä, kun komponentteja tarkastellaan kokonaisuutena. Case-kiinteistön tapauksessa virtuaalivoimalakokonaisuus laskee energiakustannuksia jopa 46 %.

2. *Miten virtuaalivoimala voi lisätä kiinteistöjen resilienssiä ja miten parempi energianhallinta tukee toimitusvarmuutta?*

Toiseen tutkimuskysymykseen voidaan vastata, että virtuaalivoimala vahvistaa resilienssiä hajauttamalla energiantuotantoa, lisäämällä joustokapasiteettia ja parantamalla operatiivista hallintaa, mitkä yhdessä tukevat toimitusvarmuutta sekä normaali- että poikkeusoloissa. Hybridilämmitys hajauttaa lämmöntuotannon energialähteitä ja pienentää riippuvuutta yksittäisestä toimitusketjusta. Tämä vähentää riskiä tilanteissa, joissa kaukolämmön saatavuus tai hinnoittelu muuttuu äkillisesti. Järjestelmä mahdollistaa lämmöntuotannon korkealla hyötysuhteella, ja resilienssiä voidaan entisestään vahvistaa kytkemällä varavoimakoneen hukkalämmön talteenotto osaksi kokonaisuutta.

Sähköakusto puolestaan mahdollistaa lyhytaikaisen sähkönsyötön kriittisille toiminnoille ilman varavoimakoneen välitöntä käynnistystä. Se toimii puskurina sähkökatkojen ja verkon häiriöiden aikana sekä tukee kuormien hallittua alasajoa. Pitkittyneissä kriisitilanteissa akusto voi vähentää polttoaineen kulutusta ja pidentää nykyisten varavoimaratkaisujen toiminta-aikaa. Älykäs energianohjaus puolestaan yhdistää järjestelmän toimivaksi kokonaisuudeksi, parantaa tilannekuvaa ja mahdollistaa energian kohdentamisen kriittisiin toimintoihin myös poikkeusoloissa. Automaattinen kuormanhallinta vähentää operatiivista riippuvuutta henkilöstöstä ja nopeuttaa reagointia häiriötilanteisiin.

3. *Kuinka energiamurros, sähkömarkkinoiden hintavaihtelut ja reservimarkkinat vaikuttavat virtuaalivoimalan liiketoimintamalliin ja kannattavuuteen?*

Kolmannen tutkimuskysymyksen osalta voidaan todeta, että virtuaalivoimalan liiketoimintamalli on suoraan sidoksissa energiamurroksen aiheuttamaan markkinadynamiikkaan. Energiamurros lisää uusiutuvan, sääriippuvaisen tuotannon osuutta, mikä kasvattaa hintavaihtelua ja tasapainotustarvetta. Tämä luo kysyntää joustokapasiteetille ja reservimarkkinoille osallistumiselle. Virtuaalivoimalan tuottorakenne perustuu kahteen osittain vastakkaiseen tekijään, eli sähkön keskihintaan ja järjestelmän volatiliteettiin. Hybridilämmitys hyötyy matalasta sähkön hinnasta suhteessa kaukolämpöön, kun taas akusto hyötyy korkeasta volatiliteetista ja markkinaepätasapainosta.

Keskeinen epävarmuustekijä liittyy reservimarkkinoiden hintatasoon ja kilpailun kiristymiseen. Mikäli joustokapasiteetin tarjonta kasvaa kysyntää nopeammin, akuston tuottopotentiaali heikkenee. Energiamurroksen rakenteelliset ajurit kuitenkin viittaavat siihen, että sähköjärjestelmän tasapainotustarve säilyy myös tulevaisuudessa, vaikka yksittäisten reservituotteiden hinnat laskisivat. Tulosten perusteella virtuaalivoimalan kannattavuus ei ole ensisijaisesti teknologiakysymys vaan operatiivisen kyvykkyyden kysymys. Monimarkkinaoptimointi, ennustemallien laatu ja järjestelmien integraatio ratkaisevat arvon muodostumisen, sillä yksittäiselle markkinalle keskittyminen ei riitä nopeasti kiristyvässä kilpailuympäristössä.

Taulukossa 14 on esitetty eri komponenttien roolit sekä kannattavuudelle että resilienssille. Taulukko havainnollistaa, kuinka investoinnin riskit ja hyödyt jakautuvat. Hybridilämmitys kantaa taloudellista perusvastuuta, kun taas akusto tarjoaa korkeampaa tuottopotentiaalia suuremmalla riskillä. Älykäs ohjaus toimii kriittisenä integraation osana, joka mahdollistaa näiden teknologioiden tehokkaan hyödyntämisen sekä sähkömarkkinoilla että poikkeusoloissa.

Taulukko 14: Työn keskeiset tulokset

Komponentti	**Taloudellinen rooli**	**Resilienssirooli**	**Markkinariski**
Hybridilämmitys	Vakaa perusta kannattavuudelle	Lämmön turvaaminen	Matala
Sähköakusto	Tuottojen maksimointi	Varavoiman tuki	Korkeampi
Älykäs ohjaus	Vähäinen, mutta mahdollistaa integraation	Tilannekuva ja priorisointi	Matala

Operatiivisesta näkökulmasta kiinteistökohtaisen virtuaalivoimalan järkevin toteutusmalli on tällä hetkellä toimiminen ulkopuolisen aggregaattorin kautta. Oman markkinaoperaattoritoiminnan rakentaminen vaatii merkittävää teknistä asiantuntemusta ja jatkuvaa markkinaseurantaa, mikä ei ole kiinteistönomistajalle kustannustehokasta yksittäisessä kohteessa. Aggregaattori pystyy hajauttamaan reserviosallistumisen riskiä ja hyödyntämään skaalaetuja monimarkkinaoptimoinnissa. Aggregaattorin valinnassa tulee kuitenkin panostaa erityisesti kyvykkyyteen monimarkkinaoptimointiin, ja lukkiutumista yhteen operaattoriin tulee välttää.

Tulevaisuuden muutos Senaatti-kiinteistöjen tasevastaavuudessa voi kuitenkin muuttaa tätä asetelmaa. Mikäli sähkön hankintakustannukset nousevat merkittävästi tasepoikkeamien vuoksi, voi virtuaalivoimalan rooli laajentua reservituotannosta oman taseen hallintaan. Tällöin akuston arvo voisi muodostua pelkästään suorista säästöistä sähkön hankinnassa. Tämä kehityskulku korostaa entisestään järjestelmän modulaarisuuden ja ohjelmistorajapintojen avoimuuden merkitystä jo investointivaiheessa, jotta mallia voidaan joustavasti muuttaa markkinarakenteiden kehittyessä.

7.2 Tieteellinen kontribuutio, rajoitteet ja jatkotutkimustarpeet

Tutkimuksen keskeinen tieteellinen kontribuutio on erillisten teknologisten ja markkinaehtoisten ratkaisujen yhdistäminen yhdeksi liiketoimintamalliksi. Aiempi tutkimus on usein tarkastellut lämpöpumppuja, sähkövarastoja tai reservimarkkinoita erillisinä ilmiöinä, eikä laadullisia vaikutuksia ole huomioitu. Tässä työssä ne on yhdistetty samaan kannattavuus- ja resilienssikehikkoon, jolloin useista yksittäin rajallisesti kannattavista hankkeista muodostuu kokonaisuutena perusteltu investointi. Työ tarjoaa kehyksen niille investointipäätöksille, joissa yhdistyvät markkinaehtoinen toiminta sekä huoltovarmuustavoitteet. Julkiselle toimijalle investoinnin arvo ei rajoitu nettonykyarvoon, vaan siihen sisältyy myös yhteiskunnallista vaikuttavuutta, toimitusvarmuutta ja strategista omavaraisuuden vahvistamista.

Tulosten yleistettävyys on pääosin hyvä Suomen ja muiden pohjoismaisten markkinoiden kontekstissa, joissa markkinarakenteet ja reservituotteet ovat samankaltaisia. Paikalliset siirto- ja kaukolämpöhinnoittelumallit sekä kiinteistökohtaiset kulutusprofiilit vaikuttavat kuitenkin investoinnin absoluuttiseen kannattavuuteen, joten tuloksia tulee yleistää harkinnanvaraisesti. Resilienssihyötyjä voidaan yleistää julkisten kohteiden lisäksi myös muihin

kohteisiin, joissa toiminnan jatkuminen on välttämätöntä. Resilienssihyödyt kuitenkin riippuvat myös laajasti nykyisten varavoimaratkaisujen lähtötasosta. Esimerkiksi tilanteessa, jossa varavoimakonetta ei ole ollenkaan, sähkövaraston hyöty on vielä suurempi.

Tutkimuksella on myös rajoitteita. Monimarkkinaoptimointia ei mallinnettu täydellisesti, vaan eri tulovirrat arvioitiin osin erillisinä ja niiden yhteisvaikutus estimoitiin. Myös komponenttien välisten synergiaetujen tarkka mallintaminen jäi tämän työn ulkopuolelle, mikä tekee tuloksista todennäköisesti varovaisia. Lisäksi analyysi perustui edellisen viiden vuoden hintadataan, eikä tulevaa markkinakehitystä voida ennustaa varmuudella. Herkkyys- ja skenaarioanalyysit kuitenkin osoittavat, että investoinnin kannattavuus kestää kohtuullisia markkinamuutoksia.

Jatkotutkimuksen näkökulmasta keskeisiä teemoja ovat virtuaalivoimaloiden vaikutukset sähköjärjestelmän tasapainoon, kaksisuuntaisen kaukolämmön mahdollisuudet, komponenttien välisen integraation syventäminen sekä portfoliotason optimointi. Laajemmassa mittakaavassa useista kiinteistökohtaisista virtuaalivoimaloista voidaan muodostaa aggregoitu resurssi, joka mahdollistaa uudenlaisen markkina-aseman ja potentiaalisesti myös itsenäisen markkinaosallistumisen ilman ulkopuolista operaattoria. Oman taseen hallintaa ei käsitelty numeerisesti tässä tutkimuksessa, sillä lähtötasoa ei toistaiseksi ole ja säästöpotentiaalia ei voida määrittää. Oman taseen hallinta voi kuitenkin tuoda merkittäviä säästöjä sähkön hankintakustannuksiin, sillä tasehinnat vaihtelevat voimakkaasti.

Yhteenvetona voidaan todeta, että virtuaalivoimalainvestointi on taloudellisesti perusteltu useissa vaihtoehtoisissa markkinaympäristöissä, erityisesti kun huomioidaan resilienssihyödyt. Hybridilämmitys muodostaa vakaan perustan, sähköakusto kasvattaa tuottopotentiaalia mutta lisää markkinariskiä ja älykäs ohjausjärjestelmä ratkaisee kokonaisuuden arvon realisoitumisen. Etenkin julkiselle toimijalle investoinnin merkitys ulottuu taloudellista tuottoa laajemmalle, sillä se on myös strateginen väline energianhallinnan ja huoltovarmuuden yhdistämiseen. Virtuaalivoimalan avulla huoltovarmuus voidaan muuttaa staattisesta varautumisesta myös normaalioloja tukevaksi ja markkinaehtoiseksi järjestelmäksi.

Lähteet

Aalto, P., Haukkala, T., Kilpeläinen, S. & Kojo, M. 2021. Chapter 1 - Introduction: electrification and the energy transition. Teoksessa: Aalto, P.(toim.) Electrification. Academic Press. 3–24. Saatavissa DOI: 10.1016/B978-0-12-822143-3.00006-8

Alaperä, I., Honkapuro, S. & Paananen, J. 2018. Data centers as a source of dynamic flexibility in smart girds. Applied energy. 229, 69–79. Saatavissa DOI: 10.1016/j.apenergy.2018.07.056

Andújar Márquez, J.M. 2023. Energy Storage Systems: Fundamentals, Classification and a Technical Comparative. 1st ed. 2023. Cham: Springer Nature Switzerland. Saatavissa DOI: 10.1007/978-3-031-38420-2

Beil, I., Hiskens, I. & Backhaus, S. 2016. Frequency Regulation From Commercial Building HVAC Demand Response. Proceedings of the IEEE. 104 (4), 745–757. Saatavissa DOI: 10.1109/JPROC.2016.2520640

Brealey, R., Myers, S., Allen, F. & Edmans, A. 2022. Principles of Corporate Finance. New York, UNITED STATES: McGraw-Hill US Higher Ed ISE.

Cai, J. & Braun, J.E. 2019. Laboratory-based assessment of HVAC equipment for power grid frequency regulation: Methods, regulation performance, economics, indoor comfort and energy efficiency. Energy and buildings. 185 (C), 148–161. Saatavissa DOI: 10.1016/j.enbuild.2018.12.022

Damian, S.E., Wong, L.A., Shareef, H., Chan, C.K., Moh, T.S.Y. & Tiong, M.C. 2025. Optimal operation of diesel generator and battery energy storage system for total fuel cost minimization in hybrid power system. Journal of power sources. 628, 235859-. Saatavissa DOI: 10.1016/j.jpowsour.2024.235859

Dayananda, D., Irons, R., Harrison, S., Herbohn, J. & Rowland, P. 2002. Capital Budgeting: Financial Appraisal of Investment Projects. 1.painos. Cambridge: University Press. Saatavissa DOI: 10.1017/CBO9780511753701

Eisenhardt, K. M. 1989. Building Theories from Case Study Research. The Academy of Management review. 14 (4), 532. Saatavissa DOI: 10.2307/258557

Energiavirasto 2026. Energian alkuperätakuu. Energiavirasto. Viitattu 6.2.2026. Saatavissa https://energiavirasto.fi/energian-alkupera

Fingrid 2026a. Aktivoitu tasesäätö. Helsinki: Fingrid. Viitattu 6.1.2026. Saatavissa https://data.fingrid.fi/data?datasets=375&datasets=376

Fingrid 2026b. Reservituotteiden hankintamäärät. Helsinki: Fingrid. Viitattu 6.1.2026. Saatavissa https://data.fingrid.fi/data?datasets=316&datasets=276&datasets=281&datasets=315&datasets=327&datasets=328&datasets=1&datasets=2

Fingrid 2026c. Reservituotteiden tuntihinnat. Helsinki: Fingrid. Viitattu 7.1.2026. Saatavissa https://data.fingrid.fi/data?datasets=317&datasets=283&datasets=318&datasets=277&datasets=51&datasets=52&datasets=329&datasets=330

Fingrid 2026d. Säätöhinta säätösähkömarkkinoilla. Viitattu 6.1.2026. Saatavissa https://data.fingrid.fi/data?datasets=106&datasets=244

Fingrid 2026e. Tilattu säätöenergia Suomen säätösähkömarkkinoilta. Helsinki: Fingrid. Viitattu 6.1.2026. Saatavissa https://data.fingrid.fi/data?datasets=34&datasets=33

Fingrid 2026f. Tuulivoiman tuotantoennuste. Helsinki: Fingrid. Viitattu 6.1.2026. Saatavissa https://data.fingrid.fi/datasets/246

Fingrid 2025a. Fingridin sähköjärjestelmävisio vuodelle 2040.

Fingrid 2025b. Frequency quality analysis 2024.

Fingrid. 2025c. Reservituottolaskuri. Viitattu 4.10.2025. Saatavissa https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit/reservituotteet-ja-markkinoille-osallistuminen/reservituottolaskuri/

Fingrid 2025d. Viidentoista minuutin vuorokausimarkkinoiden käyttöönottopäivämääräksi vahvistettu 30.9.2025. Fingrid.

Fingrid. 2024a. aFRR, automaattinen taajuuden palautusreservi. Viitattu 3.11.2025. Saatavissa https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit/reservituotteet-ja-markkinoille-osallistuminen/afrr-automaattinen-taajuuden-palautusreservi/

Fingrid. 2024b. FCR, taajuusohjattu käyttö- ja häiriöreservi. Viitattu 3.11.2025. Saatavissa https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit/reservituotteet-ja-markkinoille-osallistuminen/fcr-taajuusohjattu-kaytto--ja-hairioreservi/

Fingrid. 2024c. FCR, taajuusohjattu käyttö- ja häiriöreservi. Viitattu 3.11.2025. Saatavissa https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit/reservituotteet-ja-markkinoille-osallistuminen/fcr-taajuusohjattu-kaytto--ja-hairioreservi/

Fingrid. 2024d. FFR, nopea taajuusreservi. Viitattu 3.11.2025. Saatavissa https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit/reservituotteet-ja-markkinoille-osallistuminen/ffr-nopea-taajuusreservi/

Fingrid. 2024e. mFRR, manuaalinen taajuuden palautusreservi. Viitattu 3.11.2025. Saatavissa https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit/reservituotteet-ja-markkinoille-osallistuminen/mfrr-manuaalinen-taajuuden-palautusreservi/

Fingrid. 2024f. Reservimarkkinat. Viitattu 17.11.2025. Saatavissa https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit/reservimarkkinat/

Fingrid. 2024g. Reservit. Viitattu 3.11.2025. Saatavissa https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit/

Fingrid 2024h. Siirtojenhallinnan markkina. Fingrid. Viitattu 9.2.2026. Saatavissa https://www.fingrid.fi/kantaverkko/sahkonsiirto/siirtojenhallinta/siirtojen-hallinnan-markkina/

Fingrid. 2024i. Sähköjärjestelmän reservit. Viitattu 3.11.2025. Saatavissa https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit/sahkojarjestelman-reservit/

Fingrid. 2024j. Reservituotteiden toimintaperiaatteet ja toiminta kokonaisuutena. Viitattu 3.11.2025. Saatavissa https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit/sahkojarjestelman-reservit/

Fingrid. 2020. Nopea taajuusreservi (FFR). Viitattu 3.11.2025. Saatavissa https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinainformaatio/reservimarkkinainformaatio/nopea-taajuusreservi/

Fingrid. 2019. Markkinapaikat. Viitattu 3.11.2025. Saatavissa https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/markkinoiden-yhtenaisyys/johdanto-sahkomarkkinoihin/

Fingrid 2017a. aFRR-kapasiteettimarkkina. Fingrid. Viitattu 10.2.2026. Saatavissa https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinainformaatio/reservimarkkinainformaatio/toteutuneet-tuntikaupat/

Fingrid. 2017b. Kulutuksen ja tuotannon tasapainon ylläpito. Viitattu 3.11.2025. Saatavissa https://www.fingrid.fi/kantaverkko/sahkonsiirto/kulutuksen-ja-tuotannon-tasapainon-yllapito/

Fingrid. 2017c. Kulutusjousto. Viitattu 4.11.2025. Saatavissa https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/markkinoiden-yhtenaisyys/sahkomarkkinoiden-kehityshankkeet/kysyntajousto/

Fingrid. 2017d. Taajuusohjattu käyttö- ja häiriöreservi (FCR-N, FCR-D ylös ja FCR-D alas), vuosimarkkinahankinta ja toteutuneet tuntikaupat. Viitattu 3.11.2025. Saatavissa https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinainformaatio/reservimarkkinainformaatio/Taajuusohjattu-kaytto-ja-hairioreservi-vuosimarkkinahankinta-ja-toteutuneet-tuntikaupat/

Gong, H., Jones, E., Alden, R., Frye, A., Colliver, D. & Ionel, D. 2022. Virtual Power Plant Control for Large Residential Communities Using HVAC Systems for Energy Storage. IEEE transactions on industry applications. 58 (1), 622–633. Saatavissa DOI: 10.1109/TIA.2021.3120971

Granitsas, I.M., Oyefeso, O.E., Ledva, G.S., Mock, S.A., Hinson, S.R., Hiskens, I.A. & Mathieu, J.L. 2025. Controlling Air Conditioners for Frequency Regulation: A Real-World Example. IEEE transactions on smart grid. 16 (2), 1221–1232. Saatavissa DOI: 10.1109/TSG.2024.3513296

Haakana, J., Haapaniemi, J., Lamminpää, A. & Lassila, J. 2024. Sähkömarkkinan hintavolatiliteetin vaikutukset sähkön kulutusjoustoon ja sähkönjakelujärjestelmään. Lappeenranta: LUT-yliopisto.

Haakana, J., Haapaniemi, J., Räisänen, O. & Lassila, J. 2025. Methodology to Analyse the Feasible Use of Battery Energy Storage Systems as Part of Electricity Distribution Network Asset Management. IET generation, transmission & distribution. 19 (1), n/a. Saatavissa DOI: 10.1049/gtd2.70056

Haapaniemi, J., Tikka, V., Räisänen, O., Haakana, J. & Lassila, J. 2025. Impact Analysis of Power Based Tariff-Driven Peak Load Shaving on Electricity Distribution Networks and Distribution Business. IET generation, transmission & distribution. 19 (1). Saatavissa DOI: 10.1049/gtd2.70036

Honkapuro, S. 2025. Professori. LUT Yliopisto. Teams-haastattelu 25.11.2025.

Hou, J., Li, H., Nord, N. & Huang, G. 2022. Model predictive control under weather forecast uncertainty for HVAC systems in university buildings. Energy and buildings. 257, 111793-. Saatavissa DOI: 10.1016/j.enbuild.2021.111793

IEA. 2024. Integrating Solar and Wind. Viitattu 3.11.2025. Saatavissa https://www.iea.org/reports/integrating-solar-and-wind

Kerdphol, T., Rahman, F.S., Mitani, Y., Watanabe, M. & Kufeoglu, S. 2018. Robust Virtual Inertia Control of an Islanded Microgrid Considering High Penetration of Renewable Energy. IEEE access. 6, 625–636. Saatavissa DOI: 10.1109/ACCESS.2017.2773486

Keswani, C., Agrawal, S.S. & Sharma, D. 2025. Algorithmic Trading in the Stock Market: A Study on Leveraging Machine Learning for Enhanced Investment Decision-Making. Teoksessa: Int. Conf. Artif. Intell. Mach. Vis., AIMV. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. Saatavissa DOI: 10.1109/AIMV66517.2025.11203408

Lachal, B. 2019. Energy transition. London, England ; ISTE.

Lamponen, J. 2026. Yksikönpäällikkö. Energiavirasto. Teams-haastattelu. 21.1.2026.

Laws, N.D., Anderson, K., DiOrio, N.A., Li, X. & McLaren, J. 2018. Impacts of valuing resilience on cost-optimal PV and storage systems for commercial buildings. Renewable energy. 127 (C), 896–909. Saatavissa DOI: 10.1016/j.renene.2018.05.011

Li, B., Yong, J.C.E., Yu, L.J., Olugu, E.U. & Zhang, Z. 2024. Real-time dynamic intelligent optimization control system for building air conditioning energy consumption. AIP Conference Proceedings. 3203 (1), 020006. Saatavissa DOI: 10.1063/5.0222502

Lindholm, K. 2022. Erään kohteen sähkönjakeluverkoston poikkeusolojen resilienssin parantaminen. Diplomityö. Lappeenranta: Lappeenranta-Lahti University of Technology LUT, LUT School of Energy Systems, Sähkötekniikka. Viitattu 15.9.2025. Saatavissa URN:NBN:fi-fe2022102162706

Linja-Aho, V., Pänkäläinen, M., Turpeinen, T., Stenbäck, L.-M. & Orrberg, M. 2024. Akkuenergiavarastot ST-käsikirja 42. Espoo: Sähkötieto ry.

Lopez, A. & Bunn, D. 2025. Buildings as Batteries. The Energy journal (Cambridge, Mass.). 46 (1), 67–92. Saatavissa DOI: 10.1177/01956574241280818

Luderer, G., Madeddu, S., Merfort, L., Ueckerdt, F., Pehl, M., Pietzcker, R., Rottoli, M., Schreyer, F., Bauer, N., Baumstark, L., Bertram, C., Dirnaichner, A., Humpenöder, F., Levesque, A., Popp, A., Rodrigues, R., Strefler, J. & Kriegler, E. 2022. Impact of declining renewable energy costs on electrification in low-emission scenarios. Nature Energy. 7 (1), 32–42. Saatavissa DOI: 10.1038/s41560-021-00937-z

Lygnerud, K., Ottosson, J., Kensby, J. & Johansson, L. 2021. Business models combining heat pumps and district heating in buildings generate cost and emission savings. Energy (Oxford). 234, 121202-. Saatavissa DOI: 10.1016/j.energy.2021.121202

Matinmikko, J., Kinnunen, S.-K., Sinkkonen, T. & Kärri, T. 2022. Towards sustainable feasibility studies for P2X investments. Journal of Cleaner Production. 365, 132641. Saatavissa DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.132641

Mattila, T. 2025. Vanhempi asiantuntija. Fingrid. Teams-haastattelu 1.10.2025.

Mei, S., Tan, Q., Liu, Y., Trivedi, A. & Srinivasan, D. 2023. Optimal bidding strategy for virtual power plant participating in combined electricity and ancillary services market

considering dynamic demand response price and integrated consumption satisfaction. Energy. 284, 128592. Saatavissa DOI: 10.1016/j.energy.2023.128592

Meyn, S., Samad, T., Hiskens, I., Stoustrup, J., & SpringerLink 2018. Energy Markets and Responsive Grids Modeling, Control, and Optimization. New York, NY: Springer New York. Saatavissa DOI: 10.1007/978-1-4939-7822-9

Molyneaux, A., Leyland, G. & Favrat, D. 2010. Environomic multi-objective optimisation of a district heating network considering centralized and decentralized heat pumps. Energy (Oxford). 35 (2), 751–758. Saatavissa DOI: 10.1016/j.energy.2009.09.028

Multisilta, V. 2023. Sähkön kysyntäjouston, akkujärjestelmien ja hybridilämmitysratkaisujen vaikutus energiankäyttöön ja kustannuksiin uudisrakentamisessa. Diplomityö. Lappeenranta-Lahti University of Technology LUT, LUT School of Energy Systems, Sähkötekniikka. Viitattu 15.9.2025. Saatavissa URN:NBN:fi-fe20231221156686

Naqvi, A.A., Zahoor, A., Shaikh, A.A., Butt, F.A., Raza, F. & Ahad, I.U. 2022. Aprotic lithium air batteries with oxygen-selective membranes. Materials for Renewable and Sustainable Energy. 11 (1), 33–46. Saatavissa DOI: 10.1007/s40243-021-00205-w

Nasdaq. 2025. European Power Futures and Options. Viitattu 3.11.2025. Saatavissa https://www.nasdaq.com/solutions/nordic-european-power

Neves Motta, V., Anjos, M.F. & Gendreau, M. 2023. Optimal allocation of demand response considering transmission system congestion. Computational management science. 20 (1), 25-. Saatavissa DOI: 10.1007/s10287-023-00456-0

Nord Pool. 2025a. Intraday market. Viitattu 3.11.2025. Saatavissa https://www.nordpoolgroup.com/en/the-power-market/Intraday-market/

Nord Pool. 2025b. Prices. Viitattu 3.11.2025. Saatavissa https://data.nordpoolgroup.com/auction/day-ahead/prices?deliveryDate=latest&currency=EUR&aggregation=YearlyAggregate&deliveryAreas=NO1,NO4

Nord Pool 2025c. System price and Area price calculations. Viitattu 17.11.2025. Saatavissa https://www.nordpoolgroup.com/en/trading/Day-ahead-trading/Price-calculation/

Pellinen, J. 2019. Kustannuslaskenta ja kannattavuusajattelu. 3., uudistettu painos. Helsinki: Alma.

Porssisahko.net n.d. Hintatilastot. Viitattu 2.1.2026. Saatavilla https://porssisahko.net/tilastot

Rauf, S.B. 2023. Thermodynamics Made Simple for Energy Engineers: & Engineers in Other Disciplines. Second edition. Gistrup, Denmark: River Publishers.

Ribeiro, P.F. & Salles, R.S. 2023. Distributed energy storage in urban smart grids. London: Institution of Engineering & Technology.

Savolainen, R., Einolander, J. & Lahdelma, R. 2024. Optimizing building hybrid energy systems for demand response marketplace operation. Journal of energy storage. 102. Saatavissa DOI: 10.1016/j.est.2024.114108

Schroderus, J., Tervonen, P., Haapasalo, H., Huttula, M., Schroderus, J., Tervonen, P., Haapasalo, H. & Huttula, M. 2025. Renewable energy analysis for 2023 and estimate for 2030 in Finland. AIMS Energy. 13 (5), 1273–1300. Saatavissa DOI: 10.3934/energy.2025047

Sridhar, A., Honkapuro, S., Ruiz, F., Annala, S. & Wolff, A. 2022. Assessing the Economic and Environmental Benefits of Residential Demand Response: A Finnish case study. Saatavissa DOI: 10.1109/EEM54602.2022.9921144

Suomen uusiutuvat ry. 2024. Miksi tuulivoimaa voidaan rakentaa nykyään ilman tukia? Viitattu 30.10.2025. Saatavissa https://suomenuusiutuvat.fi/tuulivoima/faktapaperit-tuulivoimasta/miksi-tuulivoimaa-voidaan-rakentaa-nykyaan-ilman-tukia/

Tilastokeskus 2025a. Suomen virallinen tilasto (SVT): Energian kokonaiskulutus energialähteittäin. Helsinki: Tilastokeskus. Viitattu 6.10.2025. Saatavissa https://pxdata.stat.fi/PxWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin__ehk/statfin_ehk_pxt_12vq.px/

Tilastokeskus 2025b. Suomen virallinen tilasto (SVT): Sähkön hankinta energialähteittäin. Helsinki: Tilastokeskus. Viitattu 30.9.2025. Saatavissa https://pxdata.stat.fi/PxWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin__ehk/statfin_ehk_pxt_12vp.px

Tilastokeskus 2025c. Suomen virallinen tilasto (SVT): Sähköntuotannon päästökertoimet ja uusiutuvan sähkön tuotannon osuus. Helsinki: Tilastokeskus. Viitattu 2.10.2025. Saatavissa https://pxdata.stat.fi/PxWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin__ehk/statfin_ehk_pxt_14qt.px

Vilkka, H. 2023. Kirjallisuuskatsaus metodina, opinnäytetyön osana ja tekstilajina. Helsinki: Art House.

Virasjoki, V., Siddiqui, A.S., Oliveira, F. & Salo, A. 2020. Utility-scale energy storage in an imperfectly competitive power sector. Energy Economics. 88, 104716. Saatavissa DOI: 10.1016/j.eneco.2020.104716

Weimar, M.R., Anderson, D.M., Kravitz, B.S., Dahowski, R.T., Brown, S.A., Niemeyer, J.M., Somani, A. & Judd, K.S. 2018. Methodology for Valuing Resilience to Severe Events for Department of Energy Sites. Pacific Northwest National Laboratory (PNNL), Richland, WA (United States). Saatavissa DOI: 10.2172/1602427

Xu, Q., Ding, Y., Yan, Q., Zheng, A. & Du, P. 2017. Day-Ahead Load Peak Shedding/Shifting Scheme Based on Potential Load Values Utilization: Theory and Practice of Policy-Driven Demand Response in China. IEEE access. 5, 22892–22901. Saatavissa DOI: 10.1109/ACCESS.2017.2763678

Yadav, M.K., Verma, A., Panigrahi, B.K. & Rakshit, D. 2024. Real-time optimal hierarchy control of HVAC system with maximized ancillary service support in smart buildings: An experimental approach. Energy and buildings. 324, 114844-. Saatavissa DOI: 10.1016/j.enbuild.2024.114844

Yang, D., Yang, Y., Luo, J., Wang, Z. & Sha, H. 2025. Research on the impact of algorithmic trading on market volatility. Scientific Reports. 15 (1). Saatavissa DOI: 10.1038/s41598-025-15020-w

Yang, Y., Xia, S., Huang, P. & Qian, J. 2024. Energy transition: Connotations, mechanisms and effects. Energy strategy reviews. 52. Saatavissa DOI: 10.1016/j.esr.2024.101320

Yao, Y. & Shekhar, D.K. 2021. State of the art review on model predictive control (MPC) in Heating Ventilation and Air-conditioning (HVAC) field. Building and environment. 200, 107952-. Saatavissa DOI: 10.1016/j.buildenv.2021.107952

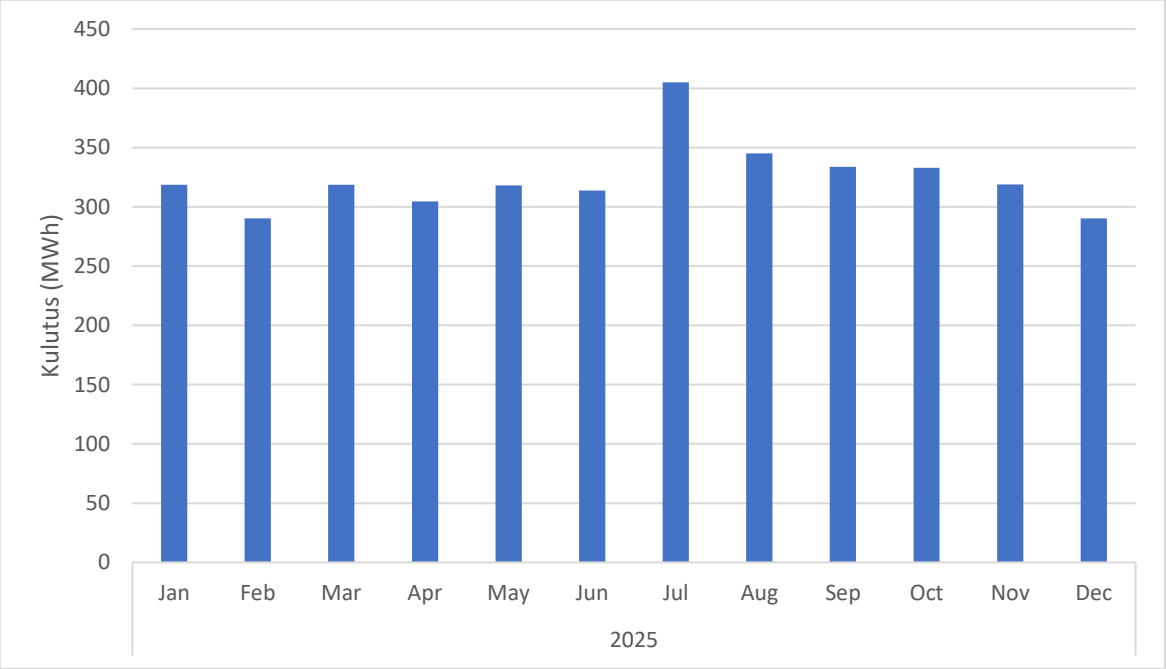
Liite 1. Case-kiinteistön esittely

Tässä liitteessä esitellään diplomityön case-kiinteistö, jonka energiankäyttö toimii virtuaalivoimalakonseptin tarkastelun lähtökohtana. Liitteessä kuvataan kiinteistön perustiedot, käyttötarkoitus sekä nykyinen sähkön ja kaukolämmön kulutus kustannusrakenteineen. Tietoja hyödynnetään työn laskelmissa ja skenaariovertailuissa.

Case-kiinteistöksi tähän diplomityöhön on valittu kiinteistö, joka sijaitsee Helsingin alueella ja sen omistaa Senaatti-kiinteistöt. Rakennus on valmistunut 2000-luvun alussa, sen kokonaispinta-ala on noin 25 000 brm² ja tilavuus on 120 000 m^3. Rakennuksen tiloja käytetään toimistokäytön lisäksi myös laboratoriotarkoitukseen. Laboratoriokiinteistön luonteen vuoksi energiajärjestelmät tulee suunnitella tarkkojen puhtaus- sekä olosuhdevaatimusten perusteella. Sähkö- ja jäähdytysjärjestelmien kapasiteetti sekä varmistus tulee suunnitella tarkasti kriittisille laitteille.

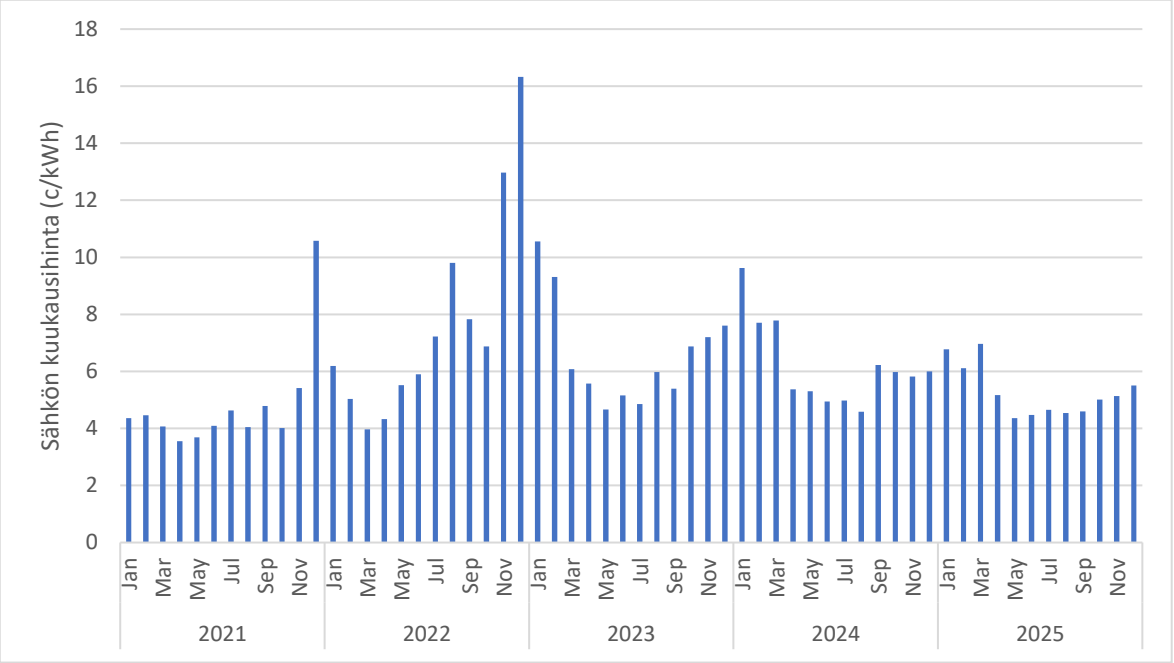
Rakennuksen energiantuotanto ja tekniset järjestelmät perustuvat tällä hetkellä kaukolämpöverkkoon ja sähköliittymään. Helsingin alueella sekä kaukolämpö- että sähköverkkoa ylläpitää Helen. Kiinteistöllä on muuntajakapasiteettia yhteensä 2 000 kVA ja kaukolämpöliittymän käyttöteho on noin 1700 kW. Lämmitys ostetaan kiinteistöön kaukolämpönä ja rakennusautomaatiojärjestelmänä on perinteinen paikallisesti asennettu valvomo-ohjelmisto. Kiinteistön sähkönsaanti on turvattu kahdella varavoimakoneella, ja välittömän varavoiman takaamiseksi kiinteistössä on myös UPS-akustoja. Lisäksi kiinteistöön on asennettu aurinkovoimalajärjestelmä, jonka kokonaisteho on noin 90 kWp.

Kiinteistön vuotuinen sähkönkulutus on noin 4 000 MWh, ja kulutuksen kuukausijakauma on pääosin tasainen, mutta kesäkuukausina on huomattavissa selvää kulutuksen kasvua jäähdytyksen takia. Keskimäärin kiinteistö kuluttaa 330 MWh kuukaudessa. Kiinteistön peruskuorma öisin sekä viikonloppuisin on noin 400 kW ja virka-ajalla kuorma on keskimäärin 600 kW. Kiinteistön kuukausittainen sähkönkulutus on esitetty alla kuvassa 1.



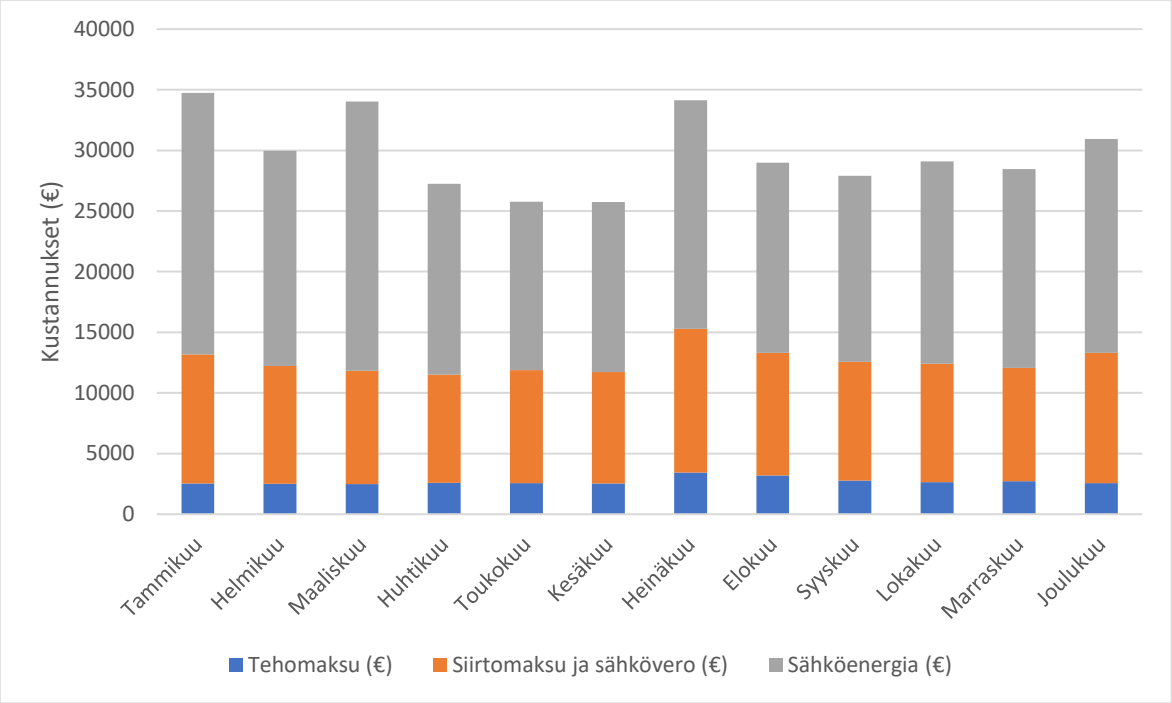
Kuva 1: Vuoden 2025 sähkönkulutus kuukausittain

Sähkön kustannusrakenne muodostuu energian hinnasta, siirtomaksuista sekä veroista. Toistaiseksi asiakas on itse hankkinut sähköt kiinteistöön, mutta sähkökustannukset voidaan mallintaa käyttämällä niitä arvoja, joilla sähkö olisi hankittu Senaatin puolesta. Sähköenergia hankitaan Hanselin kilpailutuksen kautta, jolloin jokaiselle kuukaudelle on oma kiinteä sähkönhintansa. Keskimääräinen energiahinta vuosien 2021–2025 aikana on ollut 6,1 c/kWh, mutta hinnoissa on ollut suurtakin vaihtelua. Kuukausittaiset sähkönhinnat on esitetty kuvassa 2. Kuvaajasta on nähtävissä, miten energiakriisin aikana sähkön hinnat olivat huomattavasti korkeammat kuin normaalina aikana.



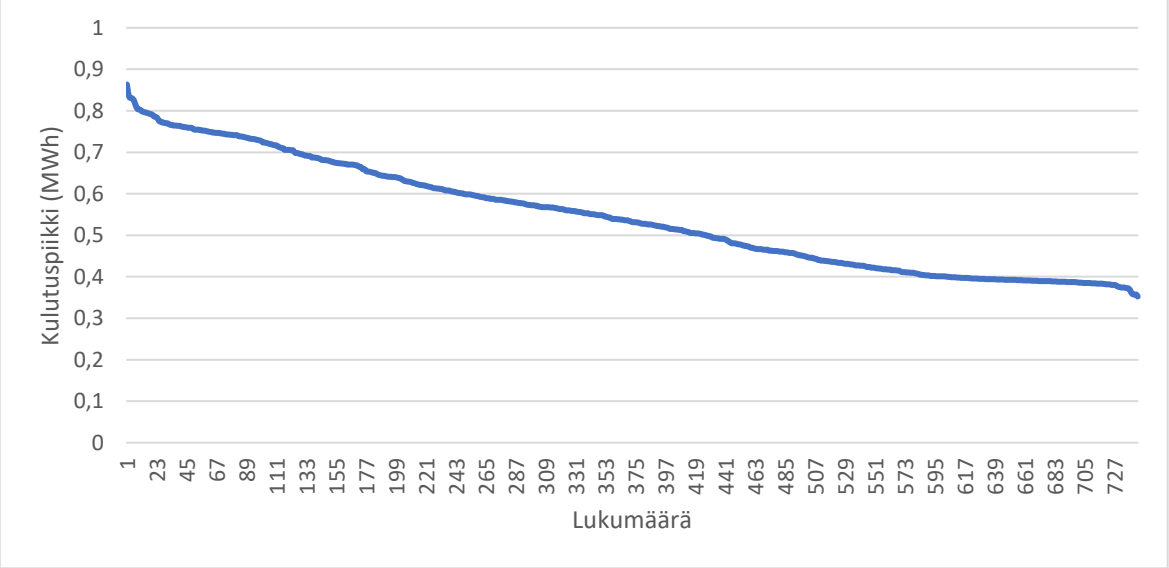
Kuva 2: Hanselin kuukausittaiset sähkön hinnat

Sähköenergian lisäksi sähkön kustannuksiin vaikuttavat myös siirtomaksut ja sähköverot. Case-kiinteistön siirtoyhtiö on Helen, ja siirtomaksut on hinnoiteltu keskijännitetehosiirron mukaan. Perussiirron hinta on 0,68 c/kWh ja talvipäivän siirtohinta on 1,52 c/kWh. Talvipäivän siirtohinta on käytössä joulu-helmikuussa arkipäivisin klo 7–21. Sähköveron suuruus on läpi vuoden 2,25 c/kWh. Tämän lisäksi siirtomaksuun sisältyy kuukausittainen perusmaksu sekä tehomaksu, joka määräytyy kyseisen kuukauden suurimman mitatun tunnin keskitehon mukaan kaavalla 3,97 €/kW. Koko vuoden sähkökustannukset ovat yhteensä noin 360 000 €, ja kustannusjakauma seuraa kulutusprofiilia, sillä tehomaksujen osuus kokonaiskustannuksista on hyvin pieni ja erot tehomaksuissa eri kuukausien välillä ovat pieniä. Sähkön kuukausikustannukset on esitetty kuvassa 3.



Kuva 3: Vuoden 2025 sähkön kuukausittaiset kokonaiskustannukset

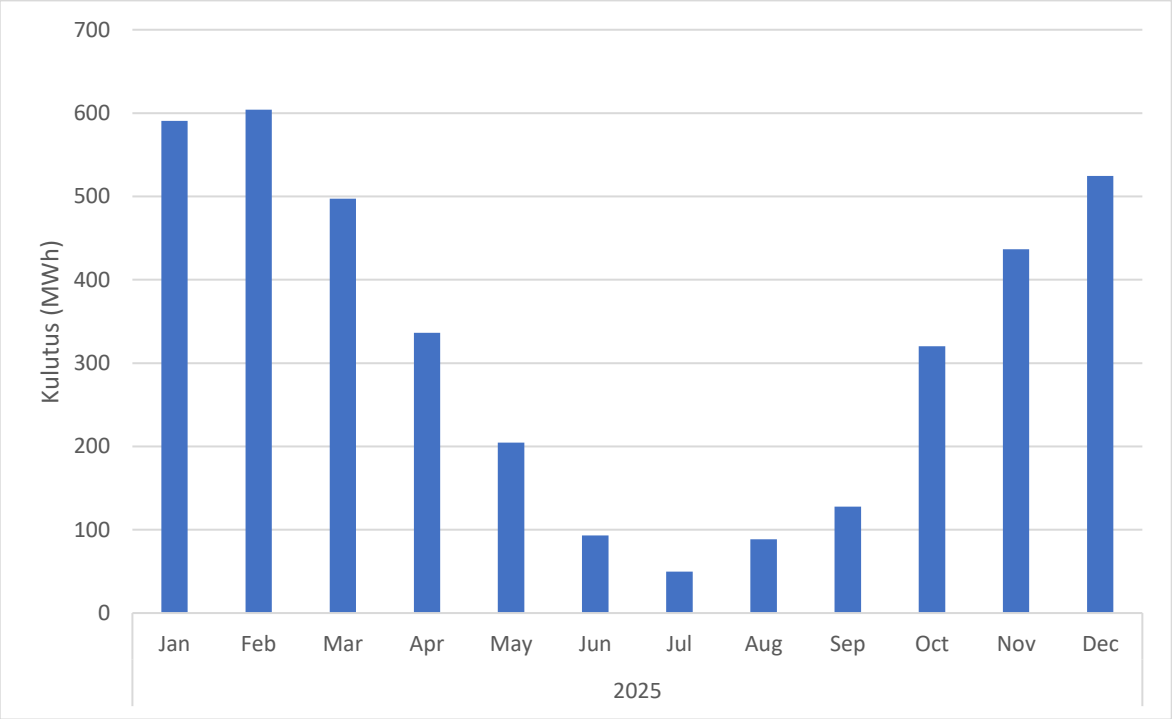
Kuvassa 4 on esitetty case-kiinteistön sähkötehon pysyvyyskäyrä vuoden 2025 heinäkuulta, jolloin myös kulutus oli suurin. Tehot jakaantuvat epätasaisesti, ja kuukaudessa esiintyy muutamia yksittäisiä korkeita tehopiikkejä. Sama ilmiö on tyypillinen myös muina kuukausina, vaikka kokonaiskulutus olisi pienempi.



Kuva 4: Case-kiinteistön sähkötehon pysyvyyskäyrä vuoden 2025 heinäkuulta

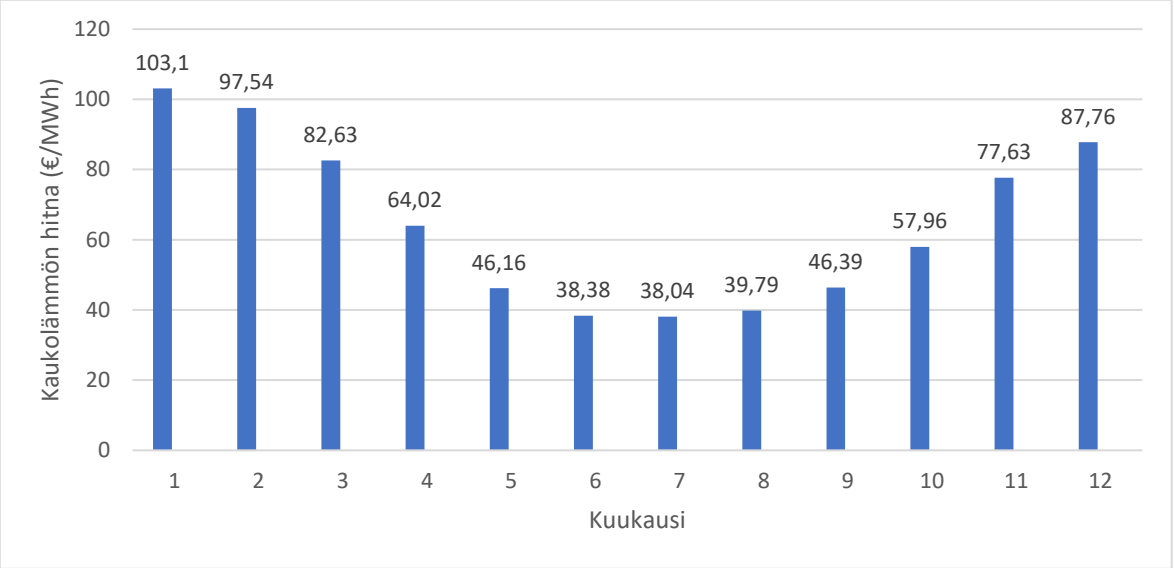
Kohteen kaukolämmön kulutus on vuodessa noin 4 000 MWh ja lämmitysenergian tarve painottuu selkeästi talvikaudelle. Kaukolämmön käyttö jakautuu pääosin tilalämmitykseen,

ilmanvaihdon lämmitykseen sekä käyttöveden tuottoon, mutta alimittaroinnin puutteen takia tarkkoja suhteita ei voida määrittää. Kuukausittainen kulutus vaihtelee ulkolämpötilan mukaan, ja suurin kulutus on vuonna 2025 ollut tammi- ja helmikuussa, kun kuukausittainen kulutus oli noin 600 MWh. Kesäisin lämpöä käytetään pääsääntöisesti vain käyttöveden tuottamiseen, ja kesäkuukausina kulutus on ollut alle 100 MWh. Kuukausittaiset kaukolämmön kulutukset on esitetty kuvassa 5.



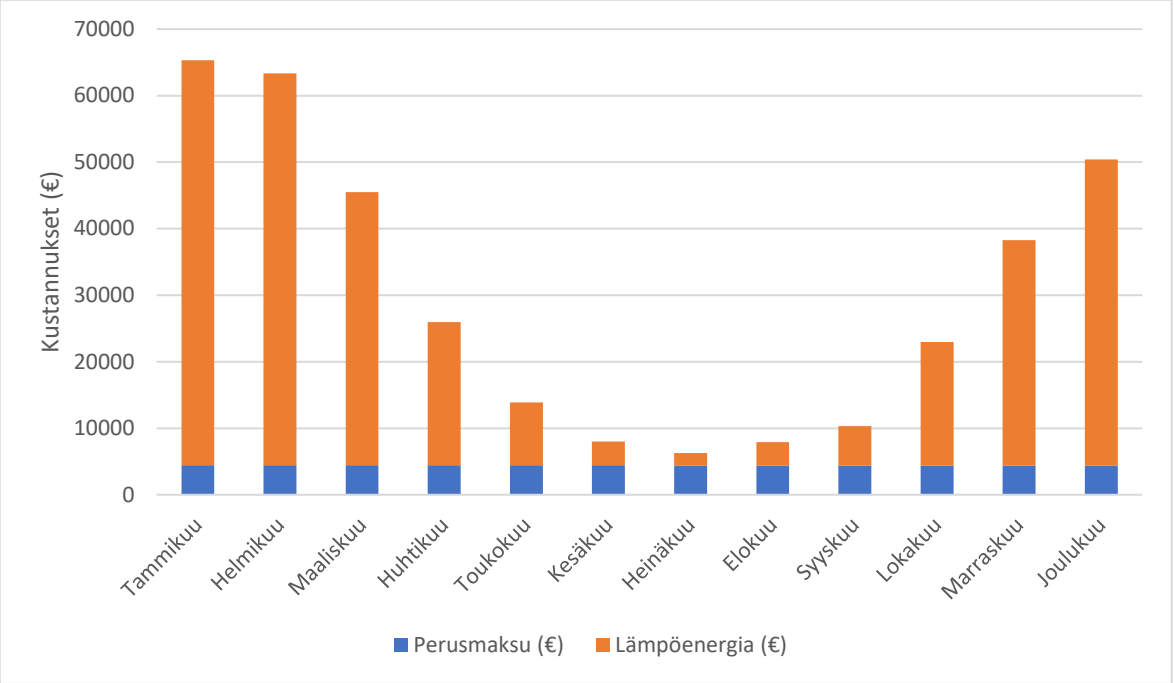
Kuva 5: Vuoden 2025 kaukolämmön kulutus kuukausittain

Myös kaukolämmön toimittajana kiinteistölle on Helen, ja kaukolämpö muodostaa merkittävän osan kiinteistön kokonaisenergiakuluista. Keskimääräinen kaukolämmön energiahinta on noin 64 €/MWh, mutta kaukolämmön hinta vaihtuu kuukausittain, ja ne on esitetty kuvassa 6. Hinnat ovat Helenin kiinteähintaisen kaukolämmön hinnat vuodelta 2025, ja näitä kuukausihintoja on käytetty laskennassa kaikille vuosille, vaikka todellisuudessa vuosien välillä on voinut olla pieniä eroja. Historiallisten kuukausihintojen saatavuus on rajallista, eikä yhtenäisen aikasarjan muodostaminen ole mahdollista ilman oletuksia. Nykyiset kuukausihinnat tarjoavat kuitenkin vertailukelpoisen perustan laskennalle.



Kuva 6: Kaukolämmön kuukausihinnat

Lisäksi kustannuksiin sisältyy tehomaksu, joka määräytyy edellisen kolmen vuoden suurimman mitatun vuorokauden keskitehon perusteella. Tehomaksun hinnasto luokitellaan käyttötehon perusteella, ja case-kiinteistö kuuluu suurimman tehon luokkaan eli yli 650 kW käyttötehon luokkaan. Tässä luokassa vuotuinen perusmaksu on 27 283 euroa, ja 650 kW ylittävältä osuudelta veloitetaan 24 euroa jokaista kilowattia kohden. Case-kiinteistön tapauksessa perusmaksun suuruus on noin 4 400 € kuukaudessa. Vuotuiset kaukolämmön kokonaiskustannukset on esitetty kuvassa 7. Kuvaajasta on nähtävissä, miten perusmaksun osuus on kokonaisuudessaan pieni, mutta kesäisin se on jopa puolet kustannuksista. Vuotuiset kaukolämmön kokonaiskustannukset ovat case-kiinteistössä keskimäärin 380 000 €.



Kuva 7: Vuoden 2025 kaukolämmön kuukausittaiset kokonaiskustannukset

Kiinteistön yhteenlaskettu vuotuinen energiankulutus sekä kaukolämmön että sähköenergian osalta on yhteensä noin 8 000 MWh, ja energiakustannukset ovat keskimäärin noin 500 000 €. Siirtomaksut sekä perusmaksut huomioiden kiinteistön energiankäytön kokonaiskustannukset ovat noin 750 000 €. Nämä lähtötiedot muodostavat teknistaloudellisen perustan, jota vasten diplomityössä arvioidaan virtuaalivoimalainvestoinnin vaikutuksia kiinteistön resilienssiin ja elinkaarikustannuksiin.

Liite 2. Haastattelukysymykset

1. Mitkä ovat mielestänne suurimmat vahvuudet ja merkittävimmät rajoitteet Suomen sähkö- ja reservimarkkinoilla tällä hetkellä?
2. Onko olemassa merkkejä siitä, että reservituotteiden määrittelyyn, vaatimuksiin tai hinnoitteluun olisi tulossa merkittäviä muutoksia lähivuosina?
3. Miten arvioitte reservimarkkinoiden pitkän aikavälin houkuttelevuutta, ja mitä keinoja on käytettävissä, jotta reservitoiminta säilyy kilpailukykyisenä?
4. Kuinka näette uusiutuvan tuotannon kasvun ja kysyntäjouston kehityksen välisen suhteen? Onko kyseessä enemmän vuorotteleva syklinen kasvu vai samanaikainen, toisiaan lisäävä kehitys?
5. Mitkä tekijät aiheuttavat eniten epävarmuutta reservimarkkinoiden ja koko sähkömarkkinan kehityksessä seuraavien 5–10 vuoden aikana?
6. Millaisia mahdollisuuksia tai haasteita näette uusien toimijoiden osallistumisessa reservimarkkinoille, ja mitä uuden toimijan kannattaa ottaa huomioon suunnitellessaan investointia reservimarkkinoille?