KANSAINVÄLINEN KATSAUS KULUTUSJOUSTOSTA SEKÄ KÄYTÖSSÄ OLEVISTA KULUTUSJOUSTOLAITTEISTOISTA JA -PALVELUISTA EUROOPASSA

INTERNATIONAL OVERVIEW OF DEMAND RESPONSE, DEMAND RESPONSE EQUIPMENTS AND FLEXIBILITY SERVICES IN EUROPE

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Sähkötekniikan kandidaatintyö

2024

Joni Kaivola

Tarkastaja: Tutkijaopettaja Juha Haakana

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUT Energiajärjestelmät

Sähkötekniikka

Joni Kaivola

Kansainvälinen katsaus kulutusjoustosta sekä käytössä olevista kulutusjoustolaitteistoista ja -palveluista Euroopassa

Sähkötekniikan kandidaatintyö

2024

49 sivua, 10 kuvaa, 1 taulukko

Tarkastaja: Tutkijaopettaja Juha Haakana

Avainsanat: kulutusjousto, sähkömarkkinat, kulutusjoustolaitteistot, kulutusjoustopalvelut, kulutusjouston aggregaattorit, Eurooppa, älymittarit, sähkötariffit

Tässä kandidaatintyössä tarkastellaan kulutusjoustoa ja käytössä olevia kulutusjoustolaitteistoja ja -palveluita Euroopassa. Työssä kulutusjoustoa ja laitteisto- sekä palveluratkaisuja tarkastellaan kirjallisuuskatsauksena. Työssä selvitetään, onko kulutusjoustolaitteistoiden ja -palveluiden osalta merkittäviä eroavaisuuksia Euroopan maiden välillä. Työssä kerrotaan kulutusjouston tämänhetkisestä integroitumisesta Euroopan maissa. Euroopan tilanteen tarkastelemisessa hyödynnetään erilaisia tieteellisiä artikkeleita sekä Euroopan energiaregulaattoreiden laatimia raportteja.

Työn tulosten perusteella Euroopan maiden välillä huomataan olevan eroja kulutusjouston sekä kulutusjoustolaitteistojen ja -palveluiden integroitumisen välillä. Maantieteelliset sijainnit sekä kansallinen lainsäädäntö ovat vaikuttaneet pääosin kulutusjouston kokonaisvaltaiseen integroitumiseen Euroopan maissa. Työn tuloksista huomataan joidenkin EU-maiden olevan sitoutunut tavoitteellisemmin kulutusjoustoratkaisuiden toteuttamiseen. Työssä todetaan myös erilaisia haasteita kulutusjoustoratkaisuiden integroimisessa, jotka pohjautuvat Euroopan maiden erilaisiin sähkömarkkinoihin, energiantuotantoteknologiaan sekä lainsäädäntöön.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

LUT School of Energy Systems

Electrical Engineering

Joni Kaivola

International overview of demand response, demand response equipments and flexibility services in Europe

Bachelor's thesis

2024

49 pages, 10 figures, 1 table

Examiner: Associate professor Juha Haakana

Keywords: demand response, electricity markets, demand response equipments, demand response services, demand response aggregators, Europe, smart meters, electricity tariffs

This bachelor's thesis examines the demand response and available demand response equipments and flexibility services in Europe. In this thesis, demand response, demand response equipments and flexibility services are examined through a literature review. The thesis examines whether there are significant differences in demand response equipments and flexibility services between European countries. The current integration of demand response in European countries is examined in the thesis. Various scientific articles and reports made by European energy regulators are utilized in examining the European situation.

Based on the result of the thesis, differences are noticed between European countries in the integration of demand response, demand response equipments and flexibility services. Geographical locations and national legislation have primarily affected the comprehensive integration of demand response in European countries. The results of thesis notes that some EU countries are more committed to achieving goals in implementing demand response solutions. The thesis also identifies various challenges in integrating demand response solutions based on diverse electricity markets, energy production technology and legislation in European countries.

LYHENNELUETTELO

Lyhenteet

AMI	Älykäs mittausinfrastruktuuri (Advanced Metering Infrastructure)
AMR	Automaattinen mittarinluenta (Automatic Meter Reading)
CEF	Verkkojen Eurooppa -väline (Connecting Europe Facility)
CHP	Sähkön ja lämmön yhteistuotanto (Combined Heat and Power)
CPP	Kriittisten hintapiikkien mukainen hinnoittelu (Critical Peak Pricing)
DLC	Suora kuormituksen ohjaus (Direct Load Control)
DSF	Kulutusjousto (Demand-Side Flexibility)
DSM	Kysyntäpuolen hallinta (Demand Side Management)
DSO	Jakeluverkonhaltija (Distribution System Operator)
EDP	Ääripäivähinnoittelu (Extreme Day Pricing)
EMS	Energianhallintajärjestelmä (Energy Management System)
HAN	Kotialueen verkko (Home Area Network)
HEMS	Kodin energianhallintajärjestelmä (Home Energy Management System)
HPC	Suuritehoiset laturit (High Power Chargers)
ILC	Epäsuora kuormituksen ohjaus (Indirect Load Control)
MDMS	Mittatietojen hallintajärjestelmä (Meter Data Management System)
NAN	Naapurustoalueen verkko (Neighborhood Area Network)
PLC	Datasähkö, sähköverkkotiedonsiirto (Power Line Communication)

RDIF	Radiotaajuinen etätunnistus (Radio Frequency Identification)
RDSM	Asuinkiinteistöjen kysyntäpuolen hallinta (Residential Demand Side Management)
REMS	Asuinkiinteistöjen energianhallintajärjestelmä (Residential Energy Management System)
RTP	Reaaliaikainen hinnoittelu (Real-Time Pricing)
ToU	Aikahinnoittelu (Time-of-Use pricing)
TSO	Siirtoverkonhaltija, kantaverkkoyhtiö (Transmission System Operator)
V2G	Energian siirtäminen ajoneuvosta sähköverkkoon (Vehicle-to-Grid)
WAN	Laajaverkko (Wide Area Network)

Sisällysluettelo

Tiivistelmä **ii**

Abstract **iii**

Lyhenneluettelo **iv**

1 Johdanto 3
2 Kulutusjousto ja sähkömarkkinat Euroopassa 4
2.1 Kulutusjouston määritelmä ja sen vaikutus sähkömarkkinoihin 4
2.1.1 Kulutusjousto-ohjelmat ja sähkömarkkinat Euroopassa 5
2.2 Kulutusjousto Euroopassa 8
2.2.1 Iso-Britannia 10
2.2.2 Saksa 10
2.2.3 Suomi ja muut Pohjoismaat 11
2.2.4 Sveitsi 12
2.2.5 Belgia 13
2.2.6 Baltian maat 13
2.3 Kotitalouksien kysyntäpuolen hallinta ja tekniikat 14
3 Kulutusjoustolaitteistot kotitalouksille Euroopassa 17
3.1 Seurantajärjestelmät 17
3.1.1 Älykkäät mittarit ja AMI 17
3.1.2 Älykkäät laitteet ja älysensorit 18
3.2 Energian hallinta- ja ohjausjärjestelmät 18
3.2.1 EMS 19
3.2.2 Älytermostaatit ja -pistorasiat 20
3.3 Tiedonvälitysjärjestelmät 21
3.4 Älykkäiden mittareiden käyttöönoton eroavaisuudet Euroopan maissa 22
3.5 Sähköautojen älykäs lataus 24
3.6 Lämpöpumppujen kulutusjousto kotitalouksille Euroopassa 26
4 Kulutusjoustopalvelut kotitalouksille Euroopassa 27
4.1 Kulutusjouston aggregaattoripalvelut 27
4.2 Hinta- ja kannustinpohjaiset kulutusjousto-ohjelmat 28

4.3 Erilaiset sähkösopimukset Euroopan maissa 29
4.4 Sähköautojen julkiset latauspisteet ja -asemat Euroopassa 31
5 Pohdinta ja tulevaisuuden skenaariot 35
6 Yhteenveto 37
Lähteet 38

1 Johdanto

Sähköverkon kulutuksen ja tuotannon välinen tasapaino on välttämätöntä sähköjärjestelmän toiminnalle. Kun kulutus ja tuotanto ovat tasapainossa, kulutusjoustoa ei tarvita. Uusiutuvien energialähteiden kuten tuulivoiman ja aurinkovoiman tuotannon lisääntyessä, ennalta arvaamattomuus ja sääriippuvuus tuotannosta myös lisääntyy. Tämän vuoksi kulutusjousto on merkittävässä osassa sähköverkon tehotasapainon kannalta. Sähköverkon tehotasapainoa ylläpidetään yleisesti reservimarkkinoiden avulla ja kulutusjouston avulla voidaan lisätä sähkön tarjontaa reservimarkkinoilla (Fingrid, n.d.-a). Kulutusjoustoon voivat osallistua eri tavoin myös kotitaloudet, joita tarkastellaan tässä kandidaatintyössä. Kuluttajilla on käytössään erilaisia kulutusjoustolaitteistoja ja -palveluita, joiden avulla he voivat osallistua kulutusjoustoon yhä merkittävämmin teknologian kehittyessä.

Tässä kandidaatintyössä tarkastellaan käytössä olevia kulutusjoustolaitteistoja ja -palveluita Euroopassa. Työn toisessa pääluvussa tarkastellaan kulutusjoustoa ja sähkömarkkinoita Euroopassa. Toisessa pääluvussa käydään läpi kulutusjouston integroitumista Euroopan eri maissa. Kolmas pääluku käsittelee käytössä olevia kulutusjoustolaitteistoja Euroopassa. Luvussa tutkitaan myös laitteiden käyttöönoton eroavaisuuksia Euroopan maiden välillä. Neljäs pääluku käsittelee tarjolla olevia kulutusjoustopalveluita Euroopassa. Aihe rajataan kotitalouksien käytössä oleviin kulutusjoustolaitteistoihin ja -palveluihin. Tämä kandidaatintyö toteutetaan kirjallisuuskatsauksena. Työssä etsitään vastausta seuraaviin tutkimuskysymyksiin:

- Mitä on kulutusjousto ja millä tavoin se vaikuttaa sähkömarkkinoihin?
- Minkälaisia kulutusjoustolaitteistoja ja -palveluita kotitalouksille on saatavissa tällä hetkellä Euroopassa?
- Mitä eroavaisuuksia Euroopan eri mailla on kulutusjouston kokonaisvaltaisessa integroitumisessa sekä kulutusjoustolaitteistoiden ja -palveluiden osalta?
- Millä eri keinoilla kotitaloudet voivat osallistua kulutusjoustoon?

2 Kulutusjousto ja sähkömarkkinat Euroopassa

Tässä luvussa käsitellään kulutusjouston määritelmää ja sen suoraa vaikutusta sähkömarkkinoihin Euroopassa. Luvussa käsitellään myös Euroopan sähkömarkkinoita sekä Euroopan maiden ja kotitalouksien osallistumista kulutusjoustoon.

2.1 Kulutusjouston määritelmä ja sen vaikutus sähkömarkkinoihin

Kulutusjoustolla (eng. demand response) tarkoitetaan kuluttajapuolen keinoja muuttaa sähkönkulutustaan poiketen heidän normaalista kulutuksestaan. Tämä voidaan yhdistää esimerkiksi sähkön hinnan muutoksiin sekä kannustemaksuihin, joiden avulla tähdätään sähkönkulutuksen vähentämiseen korkeiden sähkön hintojen aikana. Tämä pätee myös silloin, kun sähköjärjestelmän luotettavuus on vaarassa. (Pallonetto et al., 2019.) Toisin sanoen sähkön kysyntä mukautetaan sähkön saatavuuteen. Kulutusjouston tavoitteena on edesauttaa taloudellista energiankäyttöä, tehostaa sähkömarkkinoita sekä lisätä toimintavarmuutta (Latvanen, 2020). Kuluttajilla on myös käytössään erilaisia laitteita, joiden kuormitusta voidaan säätää sähkön markkinahinnan mukaan (Seppälä, 2021). Kyseisiin laitteistoihin paneudutaan syvällisemmin luvussa 3.

Sähkön kulutusjoustolla on suuri merkitys sähkömarkkinoilla, sillä tuotannoltaan vaihtelevien ja sääriippuvaisten energialähteiden määrä energiajärjestelmässä lisääntyy tulevaisuudessa (Pylväläinen, 2021). Sähkön markkinahinta ohjaa myös kuluttajia erilaisiin ratkaisuihin sähkönkulutuksessa. Varsinkin nykyisen varttitaseen avulla kuluttajat saavat lähes reaaliaikaista tietoa sähkönkulutuksestaan, jolla kuluttajat voivat vaikuttaa suoraan kulutusjoustoon. Tällöin kuluttajat pystyvät ajoittamaan sähkönkäytön entistä tehokkaammin pois kulutushuippujen ajankohdilta. Loppukuluttajille on nykyään myös tarjolla erilaisia sähkösopimusvaihtoehtoja, jotka vaikuttavat kulutusjoustoon. Näistä tuntihintainen pörssisähkö mahdollistaa parhaiten kulutuksen ajoittamisen edullisille tunneille. Pörssisähkössä sähkömarkkinoilla muodostuu spot-hinta suoraan kysynnän ja tarjonnan välisestä suhteesta. Yleistariffeissa on säädetty ainoastaan yksi hinta sähkölle, joissa sama hinta on voimassa kaikkina vuoden päivinä ja ajanhetkinä. Kulutusjouston näkökulmasta yleistariffi -pohjaisissa

sopimuksissa voi olla vaikeaa osallistua suoranaisesti kulutusjoustoon kiinteän vuorokausihinnan takia. Aikatariffit voivat olla myös tehokas sähkösopimusvaihtoehto kulutusjouston näkökulmasta, sillä esimerkiksi sähkölämmitteisessä talossa voi mahdollisesti säätää lämmityksen kulutusta yöaikaan. Aikatariffeissa on säädetty esimerkiksi yö- ja päiväsähkölle erilaiset hinnat. (Seppälä, 2021.) Erilaisia sähkösopimuksia ja niiden tarjontaa Euroopassa käsitellään tarkemmin luvussa 4.3.

2.1.1 Kulutusjousto-ohjelmat ja sähkömarkkinat Euroopassa

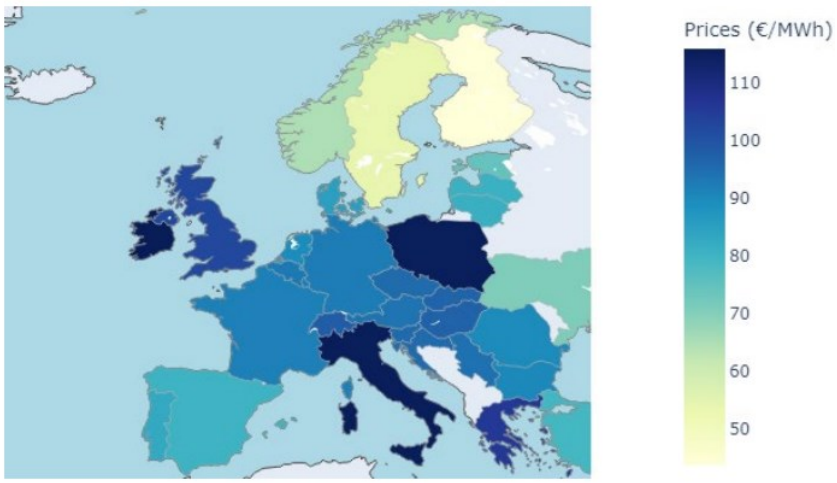
Kulutusjousto-ohjelmat (eng. demand response programs) voidaan jakaa niiden ohjausmekanismien mukaan keskitettyihin ja hajautettuihin järjestelmiin. Keskitetyissä ohjelmissa kuluttajat ovat suoraan yhteydessä energiayhtiöön kommunikoimatta keskenään ja hajautetussa ohjelmassa kuluttajat kommunikoivat keskenään ja jakavat tietoa liittyen kokonaiskulutukseen. Kulutusjousto-ohjelmiin osallistuvat energiankuluttajat, jotka voidaan jakaa kotitalouksiin sekä kaupallisiin tai teollisiin kuluttajiin. Ohjelmiin kuuluvat myös sähkömarkkinaosapuolen aggregaattorit, joiden tehtävänä on rekisteröidä ja kommunikoida kuluttajien kanssa, tehdä reaaliaikaisia mittauksia, sekä siirtää mitattuja tietoja kuluttajille. Aggregaattoreiden on myös täytettävä kokonaan niiden sähkömarkkinoiden vaatimukset ja spesifikaatiot, joille se tarjoaa palveluitaan. (Stanelyte et al., 2022.) Aggregaattorit muodostavat välikäden asiakkaalle kulutusjouston ja sähkömarkkinoiden välille (Ahti, 2022). Kolmantena osana ohjelmaan kuuluu jakeluverkonhaltija (DSO, eng. Distribution System Operator), joka ohjaa jakeluverkkoa. Tämä vastaa verkon epätasapainotilanteiden ehkäisystä antamalla sääntelysignaaleita ja käyttämällä erilaisia hinnoittelujärjestelmiä, jotka motivoivat kuluttajia seuraamaan annettuja signaaleja. (Stanelyte et al., 2022.)

Euroopan monilla valtioilla on vielä omat sähkömarkkinansa lukuun ottamatta Pohjoismaiden ja Baltian maiden Nord Pool -sähköpörssiä sekä Euroopan Epex Spot -sähköpörssiä (Salonen, 2021). Euroopan unionin pitkäjänteinen tavoite on yhdistää sähköjärjestelmät ja sähkömarkkinat Euroopassa. Tässä kuitenkin ongelmaksi koituu se, että siirtokapasiteetti on rajoitettua maiden välillä. Tavoitteeseen kuuluu myös kaupan käynti sähköstä vuorokausi- (eng. day-ahead), päivänsisäisillä (eng. intraday) ja säätösähkömarkkinoilla. (Seppälä, 2021.) Säätösähkömarkkinoilla kantaverkkoyhtiöt hankkivat säätökapasiteettia sähköjärjestelmän käyttövarmuuden ylläpitämiseksi (Fingrid, n.d.-b).

Jos sähkön siirtäminen eri aikavyöhykkeiden välillä helpottuisi, niin tällä olisi positiivinen vaikutus kulutusjouston hallintaan. Euroopan kulutuspiikit esiintyvät aikavyöhykettäin ja kulutuspiikit eivät täten kohdistu kaikkialla samalle tunnille. Tähän liittyy myös vuodenajan vaihteluista aiheutuvia sähkönkäytön kulutuspiikkejä vuosittaisessa syklissä, joita voitaisiin hallita Euroopan laajuisilla sähkömarkkinoilla nykyisiä markkinoita paremmin. (Salonen, 2021.)

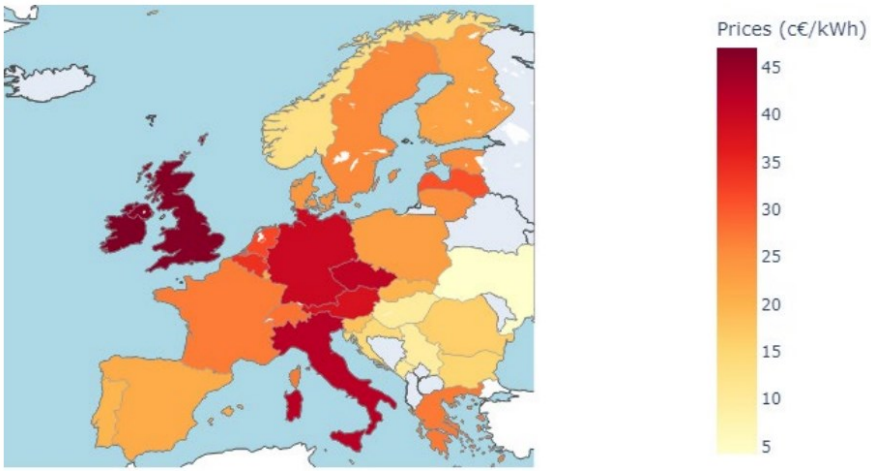
Sähkön kaupankäynnille Euroopassa on myös olemassa tukkumarkkinat (eng. wholesale market), jossa käydään kauppaa seuraavan päivän sähköstä (eng. day-ahead) tai kyseisen päivän sähköstä tunneittain (eng. intra-day) (Energiateollisuus, n.d.). Tukkumarkkinoilla tuotantolaitokset voivat myydä tuottamansa sähkön suoraan tai pörssin kautta sähköyhtiöille. Sähkön myynnille on olemassa myös vähittäismarkkinat (eng. retail market), jossa sähköyhtiöt myyvät tuotantolaitoksilta ostamansa sähkön loppukäyttäjille. (Fortum, 2021.) Tukkumarkkinoilla sähkön tukkuhinta muodostuu sähköpörsseissä kysyntä- ja tarjontakäyrien avulla (Myllykangas, 2023). Sähkön ostajat jättävät tarvittavasta sähkön määrästä ostotarjouksen sähköpörssiin ja myyjät määrittelevät kuinka paljon he ovat valmiita myymään sähköä eri hintatasoilla jokaiselle eri tunnille. Lopullinen sähkön hinta määräytyy sähkön ostajan ja myyjän tarjouksien leikkauspisteessä (Fortum n.d.). Sähkön vähittäismarkkinoiden hinta muodostuu sähköenergian hinnasta, verkkopalvelumaksusta ja veroista (Myllykangas, 2023).

Euroopan komission vuoden 2023 julkaisemassa toisen kvartaalin sähkömarkkinaraportissa on esitettyinä sähkön tukku- ja vähittäismarkkinoiden keskimääräiset sähkön hinnat Euroopassa vuoden 2023 toisessa kvartaalissa. Kuvassa 1 on ensiksi esitettynä sähkön tukkumarkkinoiden keskimääräiset hinnat yksikössä $€/MWh$.



Kuva 1. Sähkön tukkumarkkinahinnat Euroopassa maittain toisessa kvartaalissa vuonna 2023. (Euroopan komissio, 2023.)

Kuvasta voidaan todeta, että sähkön hinnat tukkumarkkinoilla ovat olleet halvimpia Pohjoismaissa, varsinkin Suomessa ja Ruotsissa. Irlannissa, Portugalissa, Italiassa ja Maltassa tukkumarkkinoiden sähkön hinnat ovat olleet kalleimpia kaikista Euroopan maista. Erot edellä mainittujen maiden sähkön tukkuhinnassa ovat yli kaksinkertaisia verrattuna Suomen ja Ruotsin keskimääräisiin sähkön tukkumarkkinoiden hintoihin. Kuvassa 2 on havainnollistettu keskimääräisiä kotitalouksien sähkön hintoja vähittäismarkkinoilla yksikössä snt(€)/kWh toisessa kvartaalissa vuonna 2023.

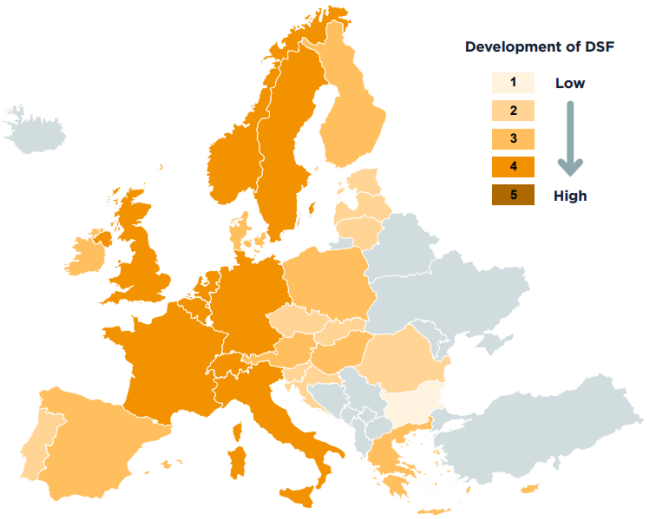


Kuva 2. Sähkön vähittäismarkkinoiden keskimääräinen sähkön hinta kotitalouksille Euroopassa maittain (ja pääkaupungeittain) toisessa kvartaalissa vuonna 2023. (Euroopan komissio, 2023.)

Sähkön hintaan on vähittäismarkkinoilla sisällytetty sähköenergian hinnan lisäksi myös arvonlisä- ja energiaverot sekä sähkön siirrosta aiheutuvat maksut (Euroopan komissio, 2023). Kuvasta nähdään sähkön vähittäismarkkinoiden keskimääräisen hinnan olevan halvimmillaan Ukrainassa, Unkarissa, Serbiassa ja Montenegrossa, kun taas kalleimmat sähkön hinnat sijoittuvat Irlantiin, Isoon-Britanniaan ja Italiaan. Myös muutamissa Keski-Euroopan maissa keskimääräinen sähkön vähittäismarkkinoiden hinta on ollut keskimääräistä korkeammalla, kuten Saksassa, Itävallassa ja Tšekeissä.

2.2 Kulutusjousto Euroopassa

Euroopan maita on kannustettu avaamaan sähkömarkkinansa kulutusjoustolle sekä kulutusjoustoaggregaattoreille, mutta toistaiseksi vain harvat maat ovat tehneet niin. Kulutusjoustoa pidetään tärkeänä työkaluna uusiutuvien energialähteiden integroinnissa ja luotettavan sähkön toimituksen varmistamisessa Euroopassa. Haaste kulutusjouston integroimiseen on se, että jokaisella maalla on erilaiset energiavarat, erilaiset sääntely- ja lainsäädäntökehykset sekä erilaiset sähkömarkkinat. Esimerkiksi joissakin maissa tuulivoiman tuottaminen on merkittävämpää, kun taas toisissa maissa aurinkovoiman tuotanto on tärkeämpää. Tämä johtaa siihen, että erilainen huipputuotannon aika vaatii erilaista siirtymää kysynnässä. Kulutusjousto-ohjelmat EU-maissa ovat voimakkaasti riippuvaisia kunkin maan omasta aloitteesta ja sen erityisestä sääntelykehyksestä, sillä yhtenäistä eurooppalaista sähkömarkkinaa ei ole vielä olemassa. (Stanelyte et al., 2022.) Smart Energy Europe ja LCPDelta on käsitellyt kulutusjouston toteutumista Euroopan eri maissa vuoden 2022 markkinaseurantaraportissaan. Kuva 3 havainnollistaa kulutusjouston (DSF, eng. Demand-Side Flexibility) kehittymistä Euroopan maissa vuonna 2022.



Kuva 3. Kulutusjouston kehittyminen Euroopan maissa vuonna 2022. (smartEn ja LCPDelta, 2023.)

SmartEn on määrittänyt viisi erilaista kriteeriä kulutusjouston kehittymisen määrittämiseen. Näitä ovat kulutusjouston sääntelykehitys, jouston potentiaalinen markkina-alue, jakeluverkon jouston, paikallisten energiajärjestelmien sekä jouston tulevaisuuden kehitys. Itä- ja Etelä-Euroopan maat ovat avanneet palveluita kulutusjouston toteuttamiselle, kun taas joidenkin kehittyneempien markkinoiden kasvu on seisahtunut. Raportin mukaan useat Euroopan maiden sähkömarkkinat ovat avanneet liitännäispalvelumarkkinansa kulutusjoustolle, esimerkiksi Kypros, Slovakia, Romania ja Kreikka. Liitännäispalvelut (eng. ancillary services) ovat palveluita, jotka hankitaan siirtoverkkoyhtiön toimesta sähkön siirron ja sähkövoimajärjestelmän tukemiseksi. Voimajärjestelmän tukemiseen liittyviä toimenpiteitä ovat esimerkiksi sähkön virtaussuunnan ylläpito, kysynnän ja tarjonnan epätasapainon korjaaminen sekä sähköverkon vikatilanteista palautuminen. Itävalta, Portugali, Espanja ja Sveitsi ovat lainsäädännön osalta avoimimmat maat paikallisille energiajärjestelmille sekä Iso-Britannia ja Alankomaat ovat johtavassa asemassa jakeluverkkojen joustomarkkinoiden kehityksessä. (smartEn ja LCPDelta, 2023.)

Seuraavaksi tarkastellaan joitakin Euroopan maita, jotka ovat integroineet kulutusjoustoa markkinoille eri tavoin.

2.2.1 Iso-Britannia

Iso-Britannia oli ensimmäisiä Euroopan maita, jotka avasivat markkinansa kulutusjoustolle. Iso-Britanniassa sähkömarkkinat vakiintuivat kulutusjoustolle, kun kansallinen sähköverkko alkoi hyödyntämään aggregaattoripalveluja tasapainottaakseen sähkön kysyntää ja tarjontaa siirtoverkossa. Tämä toteutettiin erilaisten ohjelmien kuten lyhyen aikavälin käyttöreservin (eng. short-term operating reserve) avulla. Iso-Britannia on sen ohella myös yksi harvoista eurooppalaisista maista, joissa sähkömarkkinat ja sääntelykehys mahdollistavat julkisten ja kaupallisten sektorien osallistumisen kulutusjoustoon. Näiden sektorien osallistuminen kulutusjoustoon kattaa noin kolmanneksen aggregaattoreiden portfoliosta. (Stanelyte et al., 2022.) Iso-Britannian kaikki kuusi jakeluverkonhaltijaa ovat hankkineet joustavuutta markkinoiden tarjouskilpailuiden kautta. Jakeluverkonhaltijat ovat tehneet useita kokeiluita joustavuusmarkkinoiden lisäpalveluiden, kuten loistehon palveluiden löytämiseksi. Jouston aktivoinnit ovat pysyneet matalina jakeluverkon haltijoiden hankkiman jouston vuosittaisesta kasvusta huolimatta. (smartEn ja LCPDelta, 2023.)

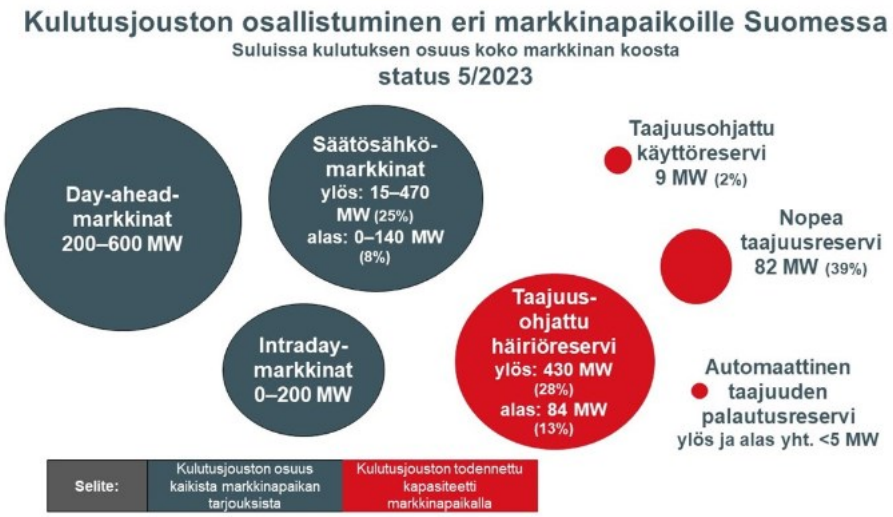
2.2.2 Saksa

Saksa tunnetaan usein johtavana maana kestävän energian hallinnassa. Saksa on osa Manner-Euroopan synkronista aluetta sekä se on liberalisoinut sähkösektorinsa eriyttämällä sen eri toimintoja, kuten sähköntuotantoa ja -jakelua. Tämä on lisännyt kilpailua sähkömarkkinoilla. Saksassa kulutuksen vähentämisen hallinta on erityisen merkittävässä osassa, sillä se perustuu laajoihin pitkän -ja keskipitkän aikavälin kulutustavoitteisiin. Nämä tavoitteet ovat jopa kunnianhimoisempia ja pitkäkestoisempia kuin ne tavoitteet, jotka ovat asetettu EU:n energiatehokkuusdirektiivissä. Saksan kulutusjouston potentiaali on suurilta osin riippuvainen uusiutuvien energialähteiden integroimisesta energiajärjestelmään sekä sähköjärjestelmän luotettavuudesta. Saksan tekninen kulutusjouston potentiaali on 6,4 GWh, josta saavutettaisiin 3,5 GWh nykyisen sääntelyn ja markkinajärjestelmän rajoissa. Markkina- ja säädösympäristöä kehittämällä, kulutusjousto voisi yltää 10 GW:n luokkaan. Saksassa kulutusjousto ei ole kuitenkaan saavuttanut suurta suosiota puutteellisen sääntelykehyksen, tiedon puutteen sekä selkeästi riittämättömän yhteisen rahoituspolitiikan vuoksi. (Stanelyte et al., 2022.) Saksassa on myös ollut vahvasti asiakaskysyntää paikallisiin energiayhteisöihin

liittyen, mutta sääntely on jäänyt jälkeen myös tässä kontekstissa hidastaen energiayhteisöiden kehitystä (smartEn ja LCPDelta, 2023).

2.2.3 Suomi ja muut Pohjoismaat

Suomi on yksi Euroopan johtavimmista maista, jolla on käytössään kulutusjoustojärjestelmä sekä se on myös edelläkävijä erilaisten älymittareiden käyttöönotossa. Suomen kantaverkkoyhtiö Fingrid vastaa verkon toiminnallisuudesta ja vastaa kysyntään markkinamekanismien kautta. Suomen siirtyessä kohti kaupallisia toimintoja, aktiiviset sähkön myyjät tarjoavat jatkuvasti erilaisia hintatariffeja kuluttajille. Tämä kannustaa kuluttajien kulutustottumusten muutoksiin markkinatilanteen mukaan. (Stanelyte et al., 2022.) Kuvassa 4 on esitettynä kulutusjouston osallistumista eri markkinapaikoille Suomessa vuonna 2023.



Kuva 4. Kulutusjouston osallistuminen eri markkinapaikoille Suomessa vuonna 2023. (Fingrid, n.d.-a.)

Kuvassa on jaoteltu eri markkinapaikoille osallistuneen kulutusjouston kapasiteetteja. Kuvasta voidaan todeta, että Suomessa on avattu liitännäispalvelumarkkinat laajasti kulutusjoustolle. Suurimmat kapasiteetit ovat käytössä day-ahead- ja säätösähkömarkkinoilla sekä automaattisesti aktivoituvassa taajuusohjatussa häiriöreservissä. Viite ”ylös” tarkoittaa sitä,

että sähkön tuotantoa voidaan kasvattaa tai kulutusta vähentää kapasiteetin sallimissa rajoissa. Viite ”alas” tarkoittaa päinvastaista eli sähkön tuotannon vähentämistä tai kulutuksen lisäämistä kapasiteettien rajoissa. (Fingrid, n.d.-c.)

Kulutusjouston potentiaali on erityisen suuri Norjassa ja Ruotsissa laajalti käytetyn sähkölämmityksen vuoksi (Stanelyte et al., 2022). Tähän mennessä Norjalla ja Ruotsilla ei ole ollut vahvaa taloudellista kannustinta kulutusjouston potentiaalin hyödyntämiseksi laajan vesivoiman tuotannon ja sen joustavuuden takia (Kirkerud et al., 2021). Pohjoismaita yhdistää kuitenkin kulutusjouston integroimisessa samoja ongelmia, jotka liittyvät uusiutuvan energian läpimurtoon voimajärjestelmissä ja tämän myötä myös sähköverkon luotattavuuteen liittyvät haasteet (Stanelyte et al., 2022). Tanskalaisen energiayhtiön Energinetin mukaan tuntiperusteisen hinnoittelun käyttöönotto Tanskassa on ensimmäinen askel kohti kulutusjouston integroitumista. Energiayhtiön mukaan tarkoituksena on luoda markkinat, jotka mahdollistavat kuluttajapuolen reagoinnin ja minimoivat samalla taloustoimikustannuksia. (Energinet, n.d.)

2.2.4 Sveitsi

Sveitsissä kysyntäpuolen hallinnan (DSM, eng. Demand Side Management) käytännöt määritellään ja toteutetaan paikallisesti. Eroavaisuus muihin Euroopan maihin on se, että Sveitsissä energiayhtiöt on käyttäneet kahta DSM-työkalua jo vuosikymmeniä. Nämä kaksi työkalua ovat verkkokäskyohjaus (eng. ripple control) sekä aikahinnoittelu (ToU, eng. Time-of-Use pricing). Verkkokäskyohjaus on kuormanhallinan muoto, joka sisältää korkeamman taajuuden signaalin lisäämisen päätehosignaalin standarditaajuudelle (50 Hz) (Stanelyte et al., 2022). Kun vastaanottolaitteet ovat yhteydessä epäolennaisiin asuin- tai teollisuuskuormiin ja vastaanottavat tämän signaalin, ne keskeyttävät kuorman toiminnan. Kuorma pysyy sammutettuna, kunnes signaali poistetaan käytöstä tai toinen taajuussignaali vastaanotetaan. (Wärtsilä, n.d.) Tämän DSM-työkalun tarkoituksena on pitää sähköverkko stabiilina. ToU-hinnoittelu jakaa päivän tiettyihin jaksoihin, joilla on tietty ennalta määrätty hinta sähkölle. Useimmat sveitsiläiset energiayhtiöt soveltavat ToU-hinnoittelua käyttäjilleen, missä sähkön hinnat vaihtelevat vuorokaudenajan mukaan. Päiväaikaiset hinnat ovat korkeammat verrattuna yöaikaisiin hintoihin, sillä kuormitus päiväsaikaan on suurempaa. Näiden hintojen ero vaihtelee 50–100 %:n välillä. Sveitsissä energiayhtiöt ovat myös ottaneet käyttöön

erilaisia energiatehokkuuteen liittyviä toimenpiteitä, kuten tiedotuskampanjoita, tehokkaiden laitteiden rahoitusta sekä älymittareiden vuokrausta. Kannustamalla uusiutuvien energialähteiden käyttöä, hajautetut voimalaitokset voivat tuottaa merkittävän osan sähköntuotannosta Sveitsissä. Tämä vaatii lisää joustavuutta keski- ja matalajänniteverkoissa kysynnän ja tarjonnan tasapainottamiseksi. (Stanelyte et al., 2022.)

2.2.5 Belgia

Belgiassa kulutusjousto-ohjelmat ovat saaneet enemmän huomiota erityisesti asuinsektoreilla, mikä johtuu uusiutuvan energiakapasiteetin tasaisesta kasvusta ja suunnitelluista ydinvoimaloiden käytöstäpoistoista. Belgian kansallinen siirtoyhtiö etsii keinoja edistää joustavuutta alentamalla energialaskuja. Joustavuus on erittäin merkittävässä osassa etenkin talvikuukausina, jolloin sähkönkulutus saavuttaa huippunsa (n. 12000–14000 MW). Tämä on noin 2000 MW enemmän kuin kesäkuukausina. (Stanelyte et al., 2022.) Belgian siirtoverkonhaltija (TSO, eng. Transmission System Operator) Elia tarjoaa helposti saatavilla olevaa tietoa verkossa esimerkiksi kulutusjoustoon osallistumisesta, ja tämän lisäksi he tarjoavat myös ladattavia tietoja liitännäispalveluista. (smartEn ja LCPDelta, 2023.)

2.2.6 Baltian maat

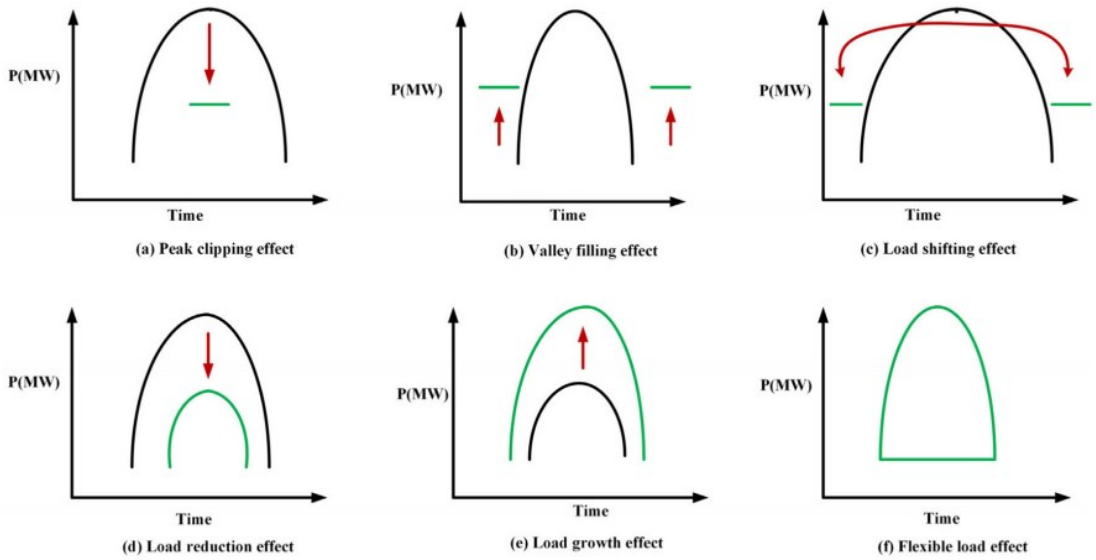
Baltian sähköverkon tasapainon hallinta muuttuu entistä monimutkaisemmaksi tulevaisuudessa kahdesta pääsyystä. Ensimmäinen syy liittyy perinteisten suurten voimalaitosten helposti säädeltävän tehon vähenemiseen, samalla kun vähemmän hallittava ja ennustettavissa oleva energiantuotanto laajenee. Toisena syynä on Baltian maiden suunnitelma irtautua kokonaan Venäjän yhtenäisestä voimajärjestelmästä vuoteen 2025 mennessä. Tämä vaatii ylimääräisten joustolähteiden kehittämistä sähkön tasapainon ylläpitämiseksi sekä normaalitilanteessa että poikkeusoloissa. Tämän toteutetaan EU:n Verkkojen Eurooppa -välineen (CEF, eng. Connecting Europe Facility) koordinointikomitean hyväksymän hankkeen avulla. Tämä hanke mahdollistaisi Baltian maiden sähköjärjestelmien itsenäistämisen taajuuden osalta Puolan sekä muiden Manner-Euroopan maiden kanssa. Baltian maissa energianintensiivinen teollisuus ei ole erityisen kehittynyttä, ja tämän takia kulutusjouston potentiaali on

rajoittunut pienempiin kuluttajamarkkinoihin. Latvia ja Viro tarjoavat hintapohjaista kulutusjoustoa kuluttajille energiasopimuksilla, joissa vähittäishinta sidotaan sähköpörssin spothintaan. Latviassa aggregaattoreiden toimintaa rajoittaa oikeudellisen kehyksen puuttuminen, joka määrittäisi aggregaattoreiden tehtävät ja velvoitteet. Esteeksi tulee myös erilaiset korvausmekanismit eri energiasektorin osallistujien välillä. Virossa on aloitettu pilottiohjelma kulutusjouston aggregaatiolle vuodesta 2017 lähtien. Vuonna 2020 liettualainen siirtoyhtiö Ignitis aloitti yhteistyön virolaisen start-up yrityksen Fuseboxin kanssa, joka pyrkii olemaan Liettuan ensimmäinen itsenäinen aggregaattori. Sähkön kysyntäpalvelu on tuore lisäys Liettuan sähkömarkkinoilla ja se on erityisen tärkeä palvelu energiaturvallisuuden ja -tehokkuuden näkökulmasta. (Stanelyte et al., 2022.)

2.3 Kotitalouksien kysyntäpuolen hallinta ja tekniikat

Kotitalouksien energiankulutus Euroopan unionissa oli 27,4 % kokonaiskulutuksesta vuonna 2020, josta 24,8 % oli sähkönkulutusta (Gordic et al., 2023). Tämä jo itsessään indikoi siihen, että kotitalouksilla on suuri vaikutus kokonaiskulutukseen sekä niiden osallistuminen kulutusjoustoon on tärkeää sähköjärjestelmän tasapainon ylläpitämiseksi. Tämän takia kotitalouksille tarjotaan ajan mukaan vaihtelevia sähkön hintoja ja asetetaan kannustimia kuorman siirtämiseen sähkönkäytön kulutushuipuista vähäisemmän sähkönkäytön ajankohtiin. Kotitaloudet voivat maksimoida sähkölaskun hinnan pienenemisen automatisoidun kuormansiirron avulla käyttäen kodin energianhallintajärjestelmää (Can Duman et al., 2023). Hallintajärjestelmiin ja laitteistoihin paneudutaan tarkemmin pääluvussa 3.

Kotitalouksien ja asuinrakennusten kysyntäpuolen hallintaan (RDSM, eng. Residential Demand Side Management) liittyy myös erilaisia tekniikoita, joiden avulla voitaisiin varmistaa mahdollisimman suuri hyöty kuluttajille sekä tuottajille. Näistä mainittakoon kuormituskäyrän erilaiset muutokset, joita on havainnollistettu kuvassa 5.



Kuva 5. Erilaisia RDSM-tekniikoita. (Panda et al., 2022.)

Kuvassa on havainnollistettu erilaisia asuinrakennusten kuormituskäyrien muokkaukseen liittyviä tekniikoita, joissa teho on kuvattu ajan funktiona. Vihreällä piirretty kuormituskäyrä on RDSM-tekniikoiden avulla muodostettu uuden kuormituskäyrän muutos alkuperäiseen mustalla piirrettyyn kuormituskäyrään. Kuormituskäyrässä (a) voidaan puhua huipunleikkauksesta (eng. peak clipping), joka liittyy kuormituksen vähentämiseen huippukausina. Huipunleikkausta hyödynnetään esimerkiksi silloin, kun uusien voimalaitosyksiköiden asennuskustannukset ovat korkeat. Kuormituskäyrä (b) kuvaa niin sanottua ”laakson täyttöä” (eng. valley filling), jossa pyritään maksimoimaan sähkönkäyttö erityisesti huippukausien ulkopuolella. Tähän liittyy myös kotitalouksien kannustaminen käyttämään sähkölaitteitaan alhaisempien tariffihintojen aikana. Kuormituskäyrä (c) kuvaa kuorman siirtämistä (eng. load shifting), jossa kuormaa siirretään huippukulutusjaksoista huipun ulkopuolisiin ajanjaksoihin. Tässä tekniikassa kannustetaan myös kotitalouksia siirtämään suuremmat kuormat kulutushuipun ulkopuolisille ajanjaksoille hyödyntäen edullisempia sähkötariffeja. Kuormituskäyrätekniikat (d) ja (e) liittyvät kuormituksen vähentämiseen (eng. load reduction) ja kasvattamiseen (eng. load growth). Kuormituksen vähentämisessä painotetaan erityisesti kuormituksen vähentämistä jokaisella ajanjaksolla, joko syklisen toiminnan avulla tai energiatehokkaampien laitteiden käytöllä. Kuorman kasvattamisessa on kyse siitä, että asiakkaita kannustetaan käyttämään sähköä sähköverkon vakauden ylläpitämiseksi ja sähköyhtiöiden sujuvan toiminnan varmistamiseksi. Kuormituskäyrätekniikka (f) liittyy

joustavaan kuormanmuokkaukseen, joka sisältää kuormituksen uudelleenjärjestelyn useille ajanjaksoille. Tässä tekniikassa kuluttajat tarjoavat vapaaehtoisesti joustavuutta kuormituksen käytössä ja heille tarjotaan erilaisia kannustimia yhteistyöstään. (Panda et al., 2022.)

3 Kulutusjoustolaitteistot kotitalouksille Euroopassa

Tässä luvussa perehdytään tarkemmin kotitalouksien käytössä oleviin erilaisiin kulutusjoustolaitteistoihin. Kyseisiä laitteistoja voidaan jakaa esimerkiksi seuranta-, kuormanhallinta- ja tiedonvälitysjärjestelmiin (Panda et al., 2022). Luku käsittelee myös lämpöpumppujen käyttöön liittyvää kulutusjoustoa sekä älykästä sähköautojen latausta. Luvussa kerrotaan tämänhetkisistä eroista älymittareiden integroitumisen osalta Euroopan eri maiden välillä.

3.1 Seurantajärjestelmät

Kodin energianhallintajärjestelmään (HEMS, eng. Home Energy Management System) liittyy erilaisia seurantajärjestelmiä, jotka vastaavat kuormaprofiilin, energiankulutuksen, mittaustietojen sekä kirjaamiseen liittyvien toimintojen seurannasta. Nämä seurantajärjestelmät voidaan jakaa älykkäisiin mittareihin, älykkääseen mittausinfrastruktuuriin (AMI, eng. Advanced Metering Infrastructure), älylaitteisiin sekä älysensoreihin. (Panda et al., 2022.)

3.1.1 Älykkäät mittarit ja AMI

Älykkäät mittarit muodostuvat elektronisesti hallitusta järjestelmästä, joista löytyy viestintäyhteys energiayhtiöiden toimijoihin. Ne mittaavat kuluttajien kuormien tehonkulutusta, sekä muita tarpeellisia tehon laadun parametreja tiettyinä ajanjaksoina. (Panda et al., 2022.) Älymittareiden avulla kuluttajat saavat tarkkaa tietoa sähkönkulutuksestaan ja mahdollistavat samalla kuluttajien osallistumisen kulutusjoustoon (Vitiello et al., 2022). Kuluttajat voivat parantaa kuormituksen käyttötottumuksiaan ja samalla säästää kuormituksesta aiheutuvia kuluja hallitsemalla käyttöään sen mukaisesti. (Panda et al., 2022.) Luvussa 3.4 käsitellään älymittareiden käyttöönottoa Euroopan maissa.

AMI-mittarit ovat tärkeä osa kodin energianhallintajärjestelmää. Ne mahdollistavat kaksisuuntaisen tiedonvaihdon älymittausten infrastruktuurin avulla sekä kiinteistöissä että sähköverkkojärjestelmässä. (Panda et al., 2022.) Perinteiset AMR-mittarit (eng. Automatic

Meter Reading) mahdollistavat yksisuuntaisen tiedonvälityksen, kun taas AMI-mittarit mahdollistavat kaksisuuntaisen tiedonvälityksen. AMI-mittarit siis muistuttavat Euroopassa käytettyjä älykkäitä mittareita. (Sarmala, 2019.) Kokonainen AMI-verkosto koostuu useista integroiduista teknologisista sovelluksista, jotka sisältävät älykkään mittauksen, laajaverkon (WAN, eng. Wide Area Network), kodin alueen verkon (HAN, eng. Home Area Network), mittatietojen hallintajärjestelmän (MDMS, eng. Meter Data Management System) sekä naapurustoalueen verkon (NAN, eng. Neighbourhood Area Network). Laajaverkko viittaa tiedonsiirtoverkkoon, joka yhdistää eri lähiverkkoja (eng. local area network) yhteen (Lampimäki, 2021). HAN helpottaa älylaitteiden liittämistä ohjainjärjestelmään. NAN-verkkoa käytetään naapurustojen välisiin mittarin lukutoimintoihin. Mittareista kirjatut tiedot välitetään keskitetysti ylläpidettyyn tietokantapalvelimeen. MDMS on tietokantajärjestelmä, jonka tehtävänä on suorittaa tiettyjä toimintoja, kuten AMI:n toimittamien tietojen analysointi ja arviointi. MDMS:n avulla varmistetaan toimitettujen tietojen tarkkuus. (Panda et al., 2022.)

3.1.2 Älykkäät laitteet ja älysensorit

Älykkäät laitteet koostuvat tyypillisistä kotitalouslaitteista, joissa on laskenta- ja viestintäominaisuudet. Älykkäinä laitteina voidaan pitää myös erilaisia energiantuotannon laitteita, kuten aurinkopaneeleita ja tuuliturbiinin generaattoreita toimiessaan yhteistyössä energianhallinnan rajapinnan kanssa. (Panda et al., 2022.)

Älysensorit pystyvät mittaamaan fyysisiä olosuhteita ja muotoja esimerkiksi kosteutta, liikettä ja lämpötilaa. Näitä laitteita voidaan liittää langattomasti tai fyysisesti valvonta- ja kirjauslaitteisiin välittääkseen aistinvaraista tietoa energianhallintajärjestelmään. Tämä auttaa energiahallintajärjestelmää optimoimaan laitteiden käyttötottumuksia. (Panda et al., 2022.)

3.2 Energian hallinta- ja ohjausjärjestelmät

Asuinkiinteistöjen energianhallintajärjestelmä (REMS, eng. Residential Energy Management System) kattaa myös erilaisia energianhallintaan ja -ohjaukseen liittyviä komponentteja. Nämä komponentit ovat vastuussa energianohjauksesta ja -hallinnasta sekä laitteiden

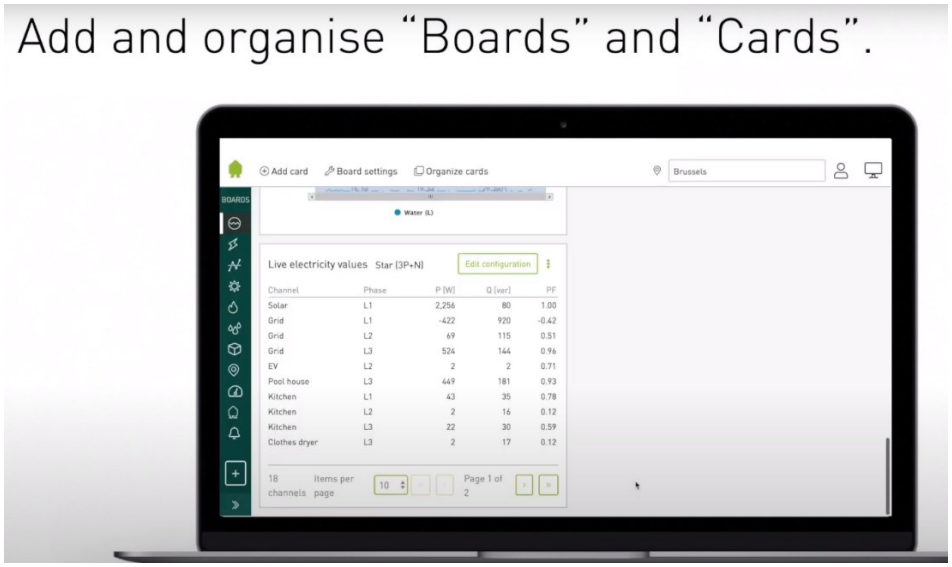
sammuttamisesta. Komponentit voidaan luokitella esimerkiksi energianhallintajärjestelmiin (EMS, eng. Energy Management System), älytermostaatteihin sekä älypistorasioihin. (Panda et al., 2022.) Tässä luvussa kerrotaan tarkemmin erilaisista energianhallintaan liittyvistä laitteistoista.

3.2.1 EMS

EMS mahdollistaa laitteiden kokonaisvaltaisen analysoinnin, seurannan ohjauksen ja käynnistyksen käyttäen aistinvaraisia tietoja, piirikytkentöjä, optimointialgoritmeja sekä ohjausparametreja. EMS muodostaa keskeisen osan REMS-järjestelmää, kun tarkastelussa on useita kuormia ja laitteita samanaikaisesti. Tämä on olennaista esimerkiksi kuormanohjaustekniikoille sekä kuormamallien muokkaukselle ja päivittämiselle. Asuinkiinteistöiden energianhallinnassa käytetyt erilaiset kuormanohjaustekniikat tarvitsevat jokaisen laitteen yksittäisen seurantakyvyn. EMS kykenee helpottamaan tätä toimenpidettä käyttämällä sopivaa infrastruktuuria loppukäyttäjän puolella mahdollistaen tiedonvaihdon yksittäisten laitteiden ja energianhallintapalvelimen välillä. Energiahallintajärjestelmän pääpainoisuuksina on parantaa rakennuksien energiaprofiilin parametreja esimerkiksi huippukulutuksen vähentämisen kautta automatisoiduilla kulutusjousto-ohjelmilla. (Panda et al., 2022.)

Belgialainen puhtaan teknologian yritys Smappee on kehittänyt EMS-järjestelmän Smappee Infinityn, jonka avulla kuluttajat voivat seurata esimerkiksi kodin energian, kaasun ja veden tiloja sovelluksen tai kojelaudan (eng. dashboard) kautta. Kuluttajilla on mahdollisuus seurata jännitettä ja ohjata dynaamisesti kuormitustaan eri laitteiden välillä käyttämällä Smappee Infinityn pilvipohjaista sovellusrajapintaa. Kuluttajat saavat reaaliaikaista ja historiallista laitekohtaista tietoa kulutuksestaan sekä mahdollisesta energiantuotannostaan. (Smappee, n.d.-a.) Smappeen kojelaudan avulla kodin tai rakennuksen energiankäyttöä voidaan tarkastella syvällisemmin. Tietoja on saatavissa esimerkiksi laitteiden ja kodin huoneiden pätö- ja loistehoista sekä tehokertoimien arvoista. Muita kojelaudalta löytyviä tietoja ovat esimerkiksi aurinkovoiman tuotanto, vienti, tuonti, omavaraisuus, itsekulutus (eng. self-consumption) ja virta. Kojelaudan avulla voidaan myös kerätä energiatietoja ja tallentaa ne Excel- tai CSV-tiedostomuotoon, jotta niitä voidaan tarkastella kuluttajan haluamassa

ohjelmistossa tarkemmin. (Smappee, 2020.) Kuvassa 6 on esitettynä Smappeen kojelaudan reaaliaikaisia sähköarvoja.



Kuva 6. Smappeen kojelaudan reaaliaikaiset sähköarvot -toiminto. (Smappee, 2019.)

Smappee Infinityssä on myös älykäs ohjaus ja dynaamisen kuormituksen tasaaminen (eng. dynamic load balancing) sekä se voidaan integroida Smappeen kehittämän sähköautojen kotilatausaseman kanssa. Smappeen dynaaminen kuormituksen tasaaminen mahdollistaa kaiken tuotetun aurinkoenergian hyödyntämisen ja varastoimisen kuluttajan akustoon, eikä ylimääräistä energiaa palauteta takaisin sähköverkkoon. Tämä toiminto on myös automatisoitu, joten kuluttajille kertyy säästöjä vaivattomasti. Dynaamisen kuormituksen tasaamistoimintojen ansiosta Smappee Infinity kykenee myös automaattisesti ohjaamaan energiaa laitteisiin kuluttajan määräämässä järjestyksessä ja kytkemään laitteita päälle tai pois päältä kaikista energiatehokkaimmalla tavalla. Tämä mahdollistaa laitteiston omavaraisuuden. (Smappee, n.d.-b.)

3.2.2 Älytermostaatit ja -pistorasiat

Älytermostaatti on laite, joka on termostaatin ohjaama. Se antaa tietyt toimintatilat kuormille, jotta asiakkaiden lämpötilan ylläpitoparametreja voidaan analysoida ja käsitellä.

Näiden termostaattisesti ohjailtavien laitteiden älykkyys perustuu niihin liitettyihin anturisovelluksiin sekä kone- ja tekoälyoppimiseen. (Panda et al., 2022.)

Saksalainen monialayritys Bosch on kehittänyt älykkään lämpöpatteritermostaatin Smart radiator thermostat II, jonka avulla kuluttajat voivat lämmittää kotejansa tehokkaammin. Termostaatteja voidaan käyttää vain yhdessä Boschin Smart Home -ohjaimen kanssa. Tämä termostaatti tarjoaa erilaisia älytoimintoja, kuten yksittäisten lämpötilojen asettamisen huonekohtaisesti, lämmityksen aikataulutuksen, joustavan ohjauksen sekä tarkan lämpötilan säädön. Huoneessa olevat useat älykkäät termostaatit voidaan yhdistää Boschin Smart Home -sovelluksessa ja niitä voidaan ohjata ryhmissä. Termostaatteja voidaan aikatauluttaa tarkasti sovelluksen avulla esimerkiksi pienentämällä huoneistoiden lämpötilaa, kun asukkaat eivät ole kotona. Sovelluksessa on myös kestävä ilmanvaihto -toiminto, jonka avulla termostaatit sammuvat heti valittujen ovien tai ikkunoiden avautuessa. Toimintoon on mahdollista asettaa myös reaktioaika, jonka jälkeen termostaatit sammutetaan. Sovelluksen avulla voidaan myös huoneistokohtaisesti asettaa lämmitys taukotilaan, mikäli asukas on pidemmän ajan poissa kotoa. (Bosch, n.d.)

Älypistorasia on laite, joka mahdollistaa peruslaitteiden toimimisen älykkäinä laitteina. Se pystyy jäsennellä siihen liitetyn laitteen sekä määrittää tarvittavat ohjausmekanismit seuraamalla liitetyn laitteen kulutusprofiilia. Se voi myös sisältää useita IoT-pohjaisia kommunikaatiolinkkejä kulutuksen seuraamiseksi ja kirjaamiseksi. Älypistorasia voi välittää myös yksittäisten laitteiden tiedot kodin energianhallintajärjestelmälle. (Panda et al., 2022.)

3.3 Tiedonvälitysjärjestelmät

Tiedonvälitysjärjestelmät ovat olennaisia DSM-tekniikoiden toteuttamisessa. Ne välittävät pääosin tietoa markkina- ja epävarmuussignaaleista mittausjärjestelmien avulla. Tiedonvälitys tapahtuu joko hyödyntämällä yksi- tai kaksisuuntaisia viestintäyhteyksiä palveluntarjoajien ja loppupään kuluttajien välillä. Yksisuuntainen tiedonvälitys on kustannustehokas ratkaisu tiedonvälitykseen. Kaksisuuntaisen tiedonvälityksen etuna on tehokkaampi valvonta- ja ohjaustoimintojen tukeminen kuin yksisuuntaisen tiedonvälityksen tilanteessa. Vaikka kaksisuuntaiset viestintäteknologiat ovat kalliimpia, niin ne ovat luotettavampia seuranta- ja

ohjaustehtävissä. Tiedonvälityksen osalta voidaan ottaa käyttöön joko langattomia tai langallisia tiedonvälitysjärjestelmiä. (Panda et al., 2022.)

Kaksi laajalti käytettyä langatonta viestintäprotokollaa ovat käytössä langattomassa tiedonvälityksessä ja ne ovat IEEE 802.15.4 (ZigBee) ja IEEE 802.11 (Wi-Fi). Näitä kahta toimintakanavaa käytetään myös älykkään mittauksen viestiyhteyksien toteuttamisessa AMI-järjestelmärakenteessa. Langattomat tiedonvälityskanavat ovat kuitenkin rajoitettuja kantomatkaltaan, joka on yleensä noin 10–15 kilometriä. Kantomatkan rajoituksien haasteiden parantamiseksi voidaan ottaa käyttöön WAN-pohjaisia tiedonsiirtokanavia, kuten GPRS, UMTS, LTE tai IEEE 802.16. (Panda et al., 2022.)

Langallinen tiedonvälitys voi sisältää monenlaisia teknologioita alueen kattavuuden perusteella. Esimerkiksi datasähköä (PLC, eng. Power Line Communication) voidaan ottaa käyttöön HAN- ja NAN-tasoilla paikallisten älyverkkojen sijaintien kattamiseksi, yleisesti 100 metrin etäisyydellä. (Panda et al., 2022.) Datasähkö perustuu tietokonedatan kuljetukseen sähköverkossa samanaikaisesti sähkön kanssa (Pussinen, 2016). Kuituoptista viestintää (eng. fibre optic communication) voidaan käyttää WAN:in tapauksessa ja siinä etäisyys on yleisesti yli 10 kilometriä (Panda et al., 2022).

3.4 Älykkäiden mittareiden käyttöönoton eroavaisuudet Euroopan maissa

Viime vuosien aikana älykkäiden mittareiden käyttöönotot ovat yleistyneet lukuisissa Euroopan maissa ja älykkäät mittarit ovat korvanneet perinteiset mittarit ja edistäneet siten verkon siirtymistä (eng. grid transition). Verkon siirtymisellä tarkoitetaan perinteisestä sähköverkosta siirtymistä kohti kestävämpää energiajärjestelmää (DNV, n.d.). Euroopassa on ollut useita linjauksia, jotka pyrkivät edistämään älykkäiden mittareiden käyttöönottoa. Ensimmäiset lainsäädännölliset määräykset älykkäistä mittareista olivat osa Euroopan unionin kolmatta energiapakettia (eng. Third Energy Package), joka tuli voimaan kaikissa Euroopan maissa ja se hyväksyttiin neuvoston ja Euroopan parlamentin toimesta vuonna 2009. Kyseiset määräykset tarkoittivat sitä, että vähintään 80 %:lla kotitalouksista olisi käytössään älymittareita vuoteen 2020 mennessä. Myös uudempi lainsäädäntö, puhtaan energian paketti (eng. Clean Energy for all Europeans), hyväksyttiin kesäkuussa vuonna 2019. Se asettaa suuntaviivat älymittareiden käyttöönotolle tulevina vuosina niissä maissa, jotka eivät vielä

olleet saattaneet älymittareiden käyttöönottoa päätökseen. (Vitiello et al., 2022.) Taulukossa 1 esitetään ACER:n (eng. Agency for the Cooperation of Energy Regulators) ja CEER:n (eng. Council of European Energy Regulators) raportin tietojen pohjalta älymittareiden käyttöönottoa, älymittareiden käyttöönoton 80 %:n tavoitteen saavuttamista, kulutuksen etäohjauksen mahdollisuutta, ToU-hinnoittelun, reaaliaikaisen energian hinnoittelun (RTP, eng. Real-Time Pricing) sekä kriittisten hintapiikkien mukaisen hinnoittelun (CPP, eng. Critical Peak Pricing) toteutumista Euroopan eri maissa vuonna 2022.

Taulukko 1: Älymittareiden saatavuus Euroopan eri maissa vuonna 2022. (CEER, 2023.)

Maa	**Tavoite (%)**	**80 % tavoite**	**ToU**	**RTP**	**Etäohjaus**	**CPP**
Ruotsi	100	Valmis		x	x	
Tanska	100	Valmis	x	x		x
Suomi	99,9	Valmis	(x)	x	x	
Viro	99,8	Valmis		x		
Espanja	99	Valmis	x	x		
Norja	99	Valmis		x	x	x
Luxemburg	98,5	Valmis				
Latvia	98	Valmis		x	x	x
Italia	97,5	Valmis	x			
Ranska	92,0	Valmis	x		x	x
Malta	92,0	Valmis				
Slovenia	91,8	Valmis	x	x	x	x
Alankomaat	88,7	Valmis	x	x		
Portugali	73	2023	x			
Itävalta	68,4	2024	x	x	x	
Iso-Britannia	56	2024	x	x		
Irlanti	56	-	x			
Belgia	22,4	2024→	x			
Kroatia	19	-				
Puola	18,7	2024→	x			
Slovakia	15,1	2021		x		
Liettua	12,3	-	x	x		
Unkari	7,3	-				
Bulgaria	0	-				
Kypros	0	2024→				
Tšekki	0	-				
Saksa	0	-	x	x	x	
Kreikka	0	-				

Kriittisten hintapiikkien mukaisessa hinnoittelussa veloitetaan enemmän sähkönkäytöstä tiettyinä huippukulutuksen ajanjaksoina (Fields, 2023). Tässä hinnoittelumallissa tehdyt sähkösopimukset spesifioivat enimmäismäärän päiviä vuodessa, joita voidaan pitää kriittisinä sekä ajanjaksot, jolloin kriittisten hintapiikkien mukaista hinnoittelua käytetään (Paterakis et al., 2017). Reaaliaikainen hinnoittelu tarjoaa kuluttajille tukkumarkkinahintojen muutokset tunnin sisällä (Stanelyte et al., 2022).

Yhteensä 13 maata Euroopasta on päässyt 80 %:n tavoitteeseen vuoteen 2022 mennessä. Joissain Euroopan maissa, kuten Irlannissa, Liettuassa ja Unkarissa ei ole määritelty kansallista lainsäädäntöä 80 %:n tavoitteen toteutumiselle, vaikka maissa onkin tehty positiivinen päätös älykkäiden mittareiden käyttöönotosta. Positiivinen tai negatiivinen päätös älymittateiden käyttöönotosta liittyy jokaisen EU-maan suorittamaan kustannus-hyötyanalyysiin (eng. cost-benefit analysis), jossa arvioidaan älymittareiden käyttöönoton kustannuksia ja hyötyjä pitkällä aikavälillä (Vitiello et al., 2022). Slovakia on taulukon mukaan jäänyt vuoden 2021 tavoitevuodesta jälkeen, sillä vain 15,1 %:lla kotitalouksista on otettu älymittareita käyttöön vuonna 2022. Kroatiassa ja Tšekeissä ei ole annettu positiivista päätöstä älykkäiden mittareiden käyttöönotolle, eikä Saksalta ja Bulgarialta ole saatu vastausta tavoitteeseen liittyen. Kreikassa älymittareiden käyttöönottoa on lykätty. Tämä johtuu raportin mukaan siitä, että julkista hankintamenettelyä on haastettu useita kertoja. (ACER ja CEER, 2023.) Raportissa ei ole selvennetty, mitä ToU-hinnoittelu tarkoittaa kyseisessä kontekstissa. Tämän takia Suomen kohdalle on taulukossa merkittynä suluissa rasti, sillä esimerkiksi Oulun Energia tarjoaa kuluttajille aikasähkösopimuksia (Oulun Energia, n.d.).

3.5 Sähköautojen älykäs lataus

Älykäs sähköajoneuvojen lataus viittaa järjestelmään, jossa sähköajoneuvo ja latauslaite sekä latauslaite ja latausoperaattori jakavat tietoyhteyden. Älykäs lataus mahdollistaa julkisen latauspaikan omistajan toimesta laitteiden valvomisen, hallinnan sekä rajoittamisen etäältä energiankulutuksen optimoimiseksi. (Virta, n.d.-a.) Julkisten älykkäiden latausasemien lisäksi kotitalouksilla on mahdollisuus myös älykkääseen kotilataukseen. Kehittyneimmissä kotitalouksien käyttöön tarkoitetuissa sähköautojen älylatureissa on mahdollisuus esimerkiksi aurinkoenergiaan pohjautuvaan lataukseen (eng. solar charging), kuormituksen tasaamiseen (eng. load balancing) sekä ajoitettuun lataukseen (eng. scheduled charging).

Sähköauton lataaminen kotona aurinkoenergiajärjestelmän avulla vähentää merkittävästi ajoneuvon käyttökustannuksia ja lisää omavaraisuutta. Tämä ei ole kuitenkaan yksinkertaista, sillä latausnopeus täytyy optimoida vastaamaan aurinkoenergian tuotantoa. Kuormituksen tasaaminen mahdollistaa sähköajoneuvon lataamisen täydellä teholla silloin, kun kotitalouden muu kuormitus on alhainen. Jos sähkönkulutus kasvaa kotitaloudessa muiden suurten kuormien vuoksi, niin latausnopeus laskee tällöin automaattisesti estääkseen pääsulakkeen katkeamisen. Ajoitettu lataus tarkoittaa sähköauton latausta silloin, kun sähkön hinnat ovat alhaisimmillaan. Tässä tapauksessa sähköauto esiasetetaan lataamaan yleisesti yöaikaan sähkön hintojen olevan alhaisimmillaan. (Svarc, 2024.)

Smappee on kehittänyt EMS-järjestelmän lisäksi myös älykkään sähköautojen latausaseman EV Wall:in, joka sisältää erilaisia älytoimintoja. Näihin kuuluu esimerkiksi aurinkovoimalla pelkästään lataaminen, dynaaminen kuormituksen tasaaminen sekä tekoälyyn pohjautuva latauksen älykäs aikataulutus. Latausasemaan kuuluu myös sovellus ja hallintapaneeli, joiden avulla kuluttaja saa yksityiskohtaisia ja reaaliaikaisia tietoja energiankulutuksesta sekä latausprosessista ja -kustannuksista. EV Wall on myös mahdollista liittää osaksi Smappee Infinityä, joka toimii kodin energiahallintajärjestelmänä. Sovelluksen avulla on myös mahdollista ajoittamaan älykkäästi sähköauton latausta. (Smappee, n.d.-c.) Sovelluksessa voi myös valita erilaisia strategioita älykkäälle lataukselle. Vaihtoehto ”surplus only” viittaa auton lataamiseen ylijäämäenergian avulla kuluttajan aurinkopaneeleista tai muista tuotannon lähteistä. Kun aurinkoenergiaa ei ole saatavilla, auto ei lataudu. Vaihtoehdossa ”schedules only” Smappeen optimointialgoritmi tietää, kuinka monta kilometriä toimintasädettä on saatava ladattua ja mihin kellonaikaan kyseinen toimintasäde tarvitaan. Optimointialgoritmi määrittää optimaaliset latausajankohdat aina seuraavalle 24 tunnille ja tämä perustuu ennustettuun aurinkoenergian tuotantoon, kulutukseen ja sähkötariffeihin. Älykäs lataustoiminto tarvitsee kuitenkin aikaa uusille asennuskohteille, jotta kuluttajan energiankulutuksesta saadaan tarkempaa tietoa. Jos sähköajoneuvoa ei ole mahdollista ladata täysin pelkällä aurinkoenergialla, se käyttää tällöin energiaa sähköverkosta edullisimmalla mahdollisella tariffilla. Autoa on mahdollista myös ladata yllä mainituiden latausstrategioiden hybridimuodolla ”schedules and surplus”. Tässä tapauksessa auto ladataan vähimmäisenergiamäärällä kuluttajan asettaman aikataulun mukaisesti. (Smappee, n.d.-d.)

3.6 Lämpöpumppujen kulutusjousto kotitalouksille Euroopassa

Perinteisten sähkölämmitysmuotojen kuten lämpöpattereiden ja lattialämmityksen ohella on olemassa myös erilaisia lämpöpumppuja, joita voidaan ohjata älykkäästi. Euroopan komission mukaan Euroopassa asennettiin 3 miljoonaa lämpöpumppuyksikköä vuonna 2022 ja tavoitteena on asentaa vähintään 10 miljoonaa lisäyksikköä vuoteen 2027 mennessä (Euroopan komissio, n.d.). Tässä luvussa käsitellään tarkemmin kotitalouksien käytössä olevia lämpöpumppuja.

Lämpöpumput ovat nykyaikaisia järjestelmiä, joita voidaan käyttää tilojen ja käyttöveden lämmitykseen sekä viilennykseen. Ne käyttävät sähköä muuntaakseen energiaa esimerkiksi maaperästä ja ilmasta käyttökelpoiseksi lämpöenergiaksi. (Weigert et al., 2020.) Lämpöpumppujen kulutusjoustoa voidaan toteuttaa käytännössä aikasähkötariffien avulla tai vaihtoehtoisella ilmoitusjärjestelmällä, joka ilmoittaa suurimmista verkon kuormittavuuden ajanjaksoista. Lämpöpumppujen toimintaa on myös mahdollista ohjata kolmannen osapuolen esimerkiksi energiayhtiön avulla, jolloin kyseessä on suora kuormituksen ohjaus. (Crawley et al., 2022.)

Esimerkiksi ruotsalainen lämpöpumppuyhtiö Thermia on suunnitellut lisäpalvelun lämpöpumpuille nimeltään Smart Price, jonka avulla lämpöpumpun käyttöä voidaan säätää Nord Poolin sähköpörssin tuntihintojen perusteella. Tässä lämpöpumppu osallistuu lisäpalvelun kautta suoraan kulutusjoustoon ohjaamalla lämpöpumpun sähkönkulutusta huippuaikoina halvemmille ajanjaksoille. Lämpöpumppu siis toimii suuremmalla teholla halvoilla sähkön tuntihinnoilla ja Smart Pricen avulla kuluttaja voi valita joko säästämis- tai mukavuustilan. Säästämistilassa sähkön tuntihinnalla on suurempi vaikutus kuin ilman tai käyttöveden lämmityksellä ja mukavuustilassa päinvastoin. Skaala kyseisten tilojen välillä on 1–5, joten kuluttaja voi halutessaan valita myös hybridimuodon valitsemalla arvon 3. (Thermia, n.d.)

4 Kulutusjoustopalvelut kotitalouksille Euroopassa

Tässä luvussa käsitellään erilaisia kulutusjoustopalveluita, joita kotitalouksille on tarjolla Euroopassa. Luvussa perehdytään tarkemmin kulutusjouston aggregaattoripalveluihin, kulutusjousto-ohjelmiin, erilaisiin sähkösopimuksiin sekä julkisiin sähköauton latauspisteisiin ja -asemiin Euroopassa.

4.1 Kulutusjouston aggregaattoripalvelut

Kulutusjouston aggregaattorit mahdollistavat loppukäyttäjille käydä kauppaa kuormituksensa joustavuudella. Aggregaattorit yhdistävät lukuisten asiakkaiden kuormia luodakseen joustavuusportfolion, joka on tarpeeksi suuri täyttääkseen joustomarkkinoiden esivalintakriteerit. Näihin kriteereihin liittyy muun muassa rajoitteiden hallinta (jännitteensäätö), tukkukauppa (day-ahead ja intraday) sekä tasapainotus (taajuudensäätö). Ne toimivat käytännössä välikätenä sähkönkuluttajille, joka mahdollistaa heidän osallistumisensa kulutusjoustomarkkinoille. Aggregaatio koostuu kahdesta pääprosessista, jotka ovat vuorovaikutus loppukuluttajien kanssa kulutusjoustoryhmän luomiseksi sekä kulutusjoustoryhmän kaupankäynti. Kulutusjoustoryhmän kaupankäynti on vuorovaikutusta jouston ostajien, kuten jakelu- ja siirtoverkkoyhtiöiden kanssa. Kulutusjouston aggregaattorit voivat toimia joko itsenäisinä palveluntarjoajina (kolmannen osapuolen kulutusjouston aggregaattorit) tai he voivat olla myös sähkön toimittajia (integroidut kulutusjouston aggregaattorit). Joustavuuden tarjoaminen ei ole osana kuluttajien sähkösopimusta, jos palveluntarjoajana toimii kolmannen osapuolen aggregaattori. Integroiduilla kulutusjouston aggregaattoreilla on helpompi luoda kulutusjoustoryhmä vakiintuneiden asiakaskuntien ja brändien tunnettavuuden takia. Heidän toimittajalupansa myöntävät heille pääsyn helpommin kulutusjoustomarkkinoille. (Rollert, 2022.)

Euroopassa on ollut noin 41 itsenäistä ja 22 integroitua kulutusjouston aggregaattoria vuonna 2018. Useat näistä aggregaattoreista työskentelevät kuitenkin teollisuus- ja liikeasiakkaiden kanssa, joilla ovat korkeat sähkönkulutuksen kustannukset. Jotkin kaupallisesti aktiiviset aggregaattorit kuitenkin tekevät yhteistyötä myös kotitalouksien kanssa esimerkiksi

sveitsiläinen startup-yritys tiko Energy Solutions. Vaikka EU:lla on tavoitteena yhtenäiset eurooppalaiset sähkömarkkinat, niin politiikat ja lainsäädännöt vaihtelevat sen jäsenvaltioiden välillä myös kulutusjouston aggregoinnissa. EU:n sähködirektiivi (eng. EU Electricity Directive) edellyttää erityisesti kaikkien asiaankuuluvien markkinoiden avaamista kulutusjoustolle, mukaan lukien tukku-, tasapaino ja liitännäispalvelumarkkinat. Siitä huolimatta EU:n jäsenvaltiot ovat eri vaiheissa näiden säädösten toteuttamisessa. Ranskan, Irlannin, Belgian ja entisen EU-maan Iso-Britannian katsotaan olevan edistyneimpiä maita kulutusjouston aggregaattoreiden integroimisessa sähkömarkkinoille. (Rollert, 2022.)

4.2 Hinta- ja kannustinpohjaiset kulutusjousto-ohjelmat

Kulutusjoustoon liittyvät kulutusjousto-ohjelmat ovat usein jaoteltu hinta- ja kannustinpohjaisiksi. Hintapohjaisessa kulutusjousto-ohjelmassa käyttäjät maksavat sähköstä eri hinnoilla päivän aikana. Tällöin kuluttajat voivat siirtää sähkönkäytön edullisimpiin ajankohtiin. Kannustinpohjaisessa kulutusjousto-ohjelmassa asiakkaat saavat tietyn rahallisen palkkion sähkönkulutuksen vähentämisestä kuormituksen ollessa korkealla. (Shi et al., 2020.) Näihin liittyvät kulutusjousto-ohjelmat pyrkivät aktivoimaan kuluttajapuolta yhä enemmän, jotta voidaan saavuttaa erilaisia toiminnallisia ja taloudellisia etuja lähestyen yhä kestävämpää sähköjärjestelmän rakenteen kehitystä (Paterakis et al., 2017).

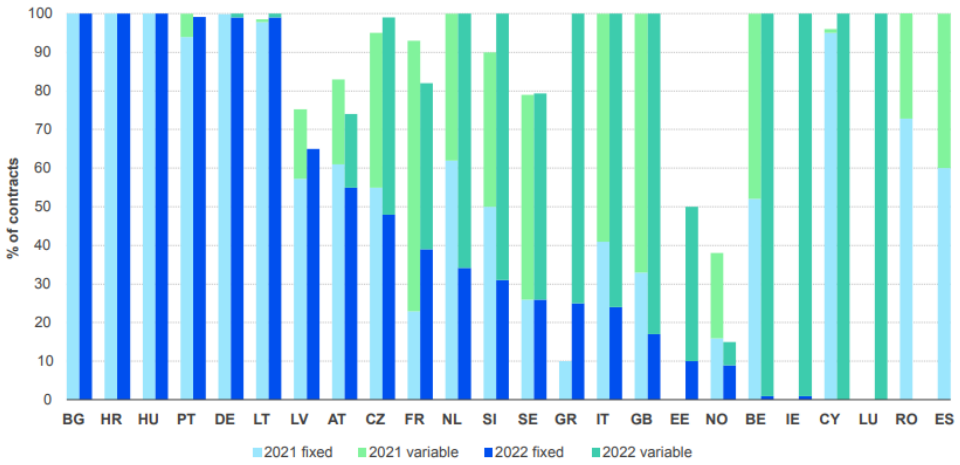
Hintapohjaiset palvelut sisältävät RTP:n, ääripäivähinnoittelun (EDP, eng. Extreme Day Pricing), CPP:n sekä ToU-hinnoittelun. EDP on samankaltainen kuin CPP, mutta sähkön korkeampi hinta on voimassa koko päivän ajan ja päivän ajankohta ei ole tiedossa vasta kuin ennen yhtä päivää etukäteen (Albadi ja El-Saadany, 2007).

Kannustinpohjaiset palvelut voidaan jakaa kahteen eri ryhmään, suoraan (DLC, eng. Direct Load Control) ja epäsuoraan (ILC, eng. Indirect Load Control) kuormituksen ohjaukseen (Stanelyte et al., 2022). DLC:ssä käyttäjät antavat kannustimista vastineeksi järjestelmän operaattorille mahdollisuuden ohjata kodinkoneita etäohjauksella vastaten sähköverkon tarpeisiin, kuten taajuudensäätöön. ILC:ssä kotitaloudet suorittavat kulutusjoustoa hyödyntämällä heidän valitsemaansa aikaperusteista sähkötariffia ilman etäoperaattorin ohjausta. Kotitaloudet voivat ohjata kodinkoneita itsenäisesti ilman tietosuojaongelmia. DLC voi edesauttaa suurempaan kulutusjoustoon kuormituksen vähentämisen osalta kuin ILC, mutta

alhaisemmalla asiakkaiden osallistumisella. DLC voi aiheuttaa tietosuojaongelmia liittyen energiankäyttötietojen keräämiseen, joita voidaan käsitellä kolmansien osapuolten käsissä. ILC:n ollessa käytössä kotitaloudet voivat vaihtaa heidän sähkölaitteiden käytön tottumuksia itsenäisesti tai automaattisten laitteiden avulla. (Can Duman et al., 2023.) Esimerkiksi sähköauton älykäs lataaminen voidaan energiayhtiöiden palveluiden avulla toteuttaa DLC:nä. Suomalainen sähköyhtiö Fortum on kehittänyt Fortum Älylataus -sovelluksen, jonka avulla kuluttajat voivat ladata sähköautoaan edullisimmilla pörssisähkön tunneilla. Fortum saa pääsyn sähköauton dataan ja tämän myötä Älylataus -sovellus pystyy käyttämään tiettyjä tietoja hyväkseen, kuten lataustilaa, akun kokoa, asiakkaan määrittelemää lähtöaikaa ja kotilaturin latausnopeutta. Tietojen keräämisen perusteella Fortum Älylataus luo mahdollisimman tarkan lataussuunnitelman autolle. (Fortum, n.d.)

4.3 Erilaiset sähkösopimukset Euroopan maissa

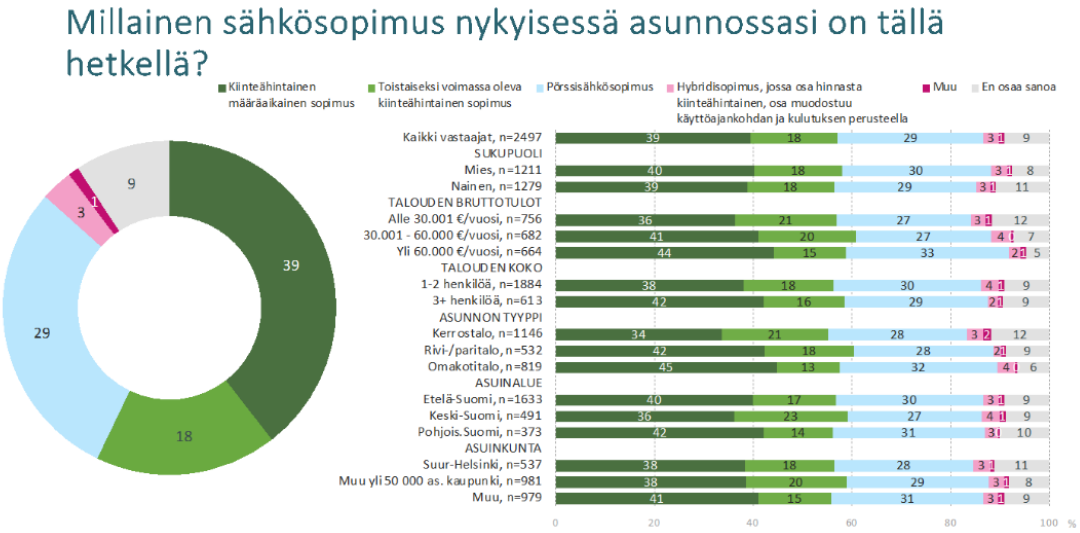
Euroopassa on tarjolla monia erilaisia sähkösopimuksia, joita energiayhtiöt tarjoavat kuluttajille. Erilaisten sähkösopimuksien avulla voidaan vaikuttaa kuluttajien osallistumiseen kulutusjoustoon. Näistä sähkösopimuksista yleisimpiä Euroopan maissa ovat kiinteähintaiset (eng. fixed) ja muuttuvahintaiset (eng. variable) sähkösopimukset. ACER:in ja CEER:in vuonna 2023 laatiman markkinaseurantaraportin mukaan yhteensä 21:llä EU-maalla on tarjolla kiinteähintaisia sähkösopimuksia vuonna 2022. Muuttuvahintaisia sähkösopimuksia oli tarjolla 16 EU-maalla samana vuonna. Kiinteähintaiset sähkösopimukset viittaavat tarjouksiin, joissa sähkön yksikköhinta ei muutu tietyn ajanjakson aikana. Muuttuvahintaiset sähkösopimukset määritellään taas sopimuksiksi, joissa sähkön yksikköhinta voi muuttua milloin tahansa. (ACER ja CEER 2023.) Raportissa on myös listattuna esimerkiksi muuttuvat spot-hintaiset sähkösopimukset (eng. variable spot based), jota kutsutaan myös pörssisähkösopimuksiksi. Tämänkaltaisessa sähkösopimuksessa sähkön hinta vaihtelee tunneittain sähköpörssin markkinahinnan mukaan (Helen, n.d.). Kymmenessä EU-maassa on ollut tarjolla muuttuvia spot-hintaisia sähkösopimuksia vuonna 2022 (ACER ja CEER, 2023). Kuvassa 7 esitetään yksityiskohtaisemmin Euroopan eri maiden kiinteä- ja muuttuvahintaisten sähkösopimusten prosentuaaliset määrät vuosina 2021 ja 2022.



Kuva 7. Kiinteä- ja muuttuvahintaisten sähkösopimusten prosentuaaliset osuudet Euroopan maissa vuonna 2021 ja 2022. (CEER, 2023.)

EU-maista löytyy suuria eroja liittyen muuttuviin ja kiinteisiin sähkösopimuksiin. Esimerkiksi Belgialla, Kyproksella, Irlannilla ja Luxemburgilla oli käytössään lähes 100 % muuttuvahintaisia sopimuksia vuonna 2022, kun taas Bulgarialla, Saksalla, Kroatialla, Unkarilla, Liettualla ja Portugalilla oli käytössään lähes 100 % kiinteähintaisia sopimuksia. Ranskassa, Portugalissa, Latviassa ja Kreikassa kiinteähintaisten sähkösopimusten määrä on noussut vuodesta 2021, kun taas esimerkiksi Itävallassa, Tšekeissä, Alankomaissa ja Isossa-Britanniassa niiden määrä on laskenut vuodesta 2021. Muuttuvahintaisten sähkösopimusten määrä on noussut esimerkiksi Isossa-Britanniassa, Belgiassa, Alankomaissa ja Tšekeissä vuodesta 2021, kun taas Ranskassa ja Norjassa niiden määrä on laskenut vuodesta 2021.

Sähköyhtiö Nordic Green Energy on laatinut taloustutkimuksen (2023) suomalaisten sähkösopimuksista vuonna 2023. Vastaajien määrä tutkimuksessa oli 2497 ja tutkimus painottui Manner-Suomessa asuviin 15–79 vuotiaisiin ihmisiin. Kuva 8 havainnollistaa yksityiskohtaisemmin kyselyyn vastanneiden prosentuaalista jakautumista bruttotulojen, talouden koon, asunnon tyypin sekä asuinalueen ja -kunnan välillä.



Kuva 8. Kyselyyn vastanneiden suomalaisten sähkösopimusten tilanne vuonna 2023. (Nordic Green Energy, 2023.)

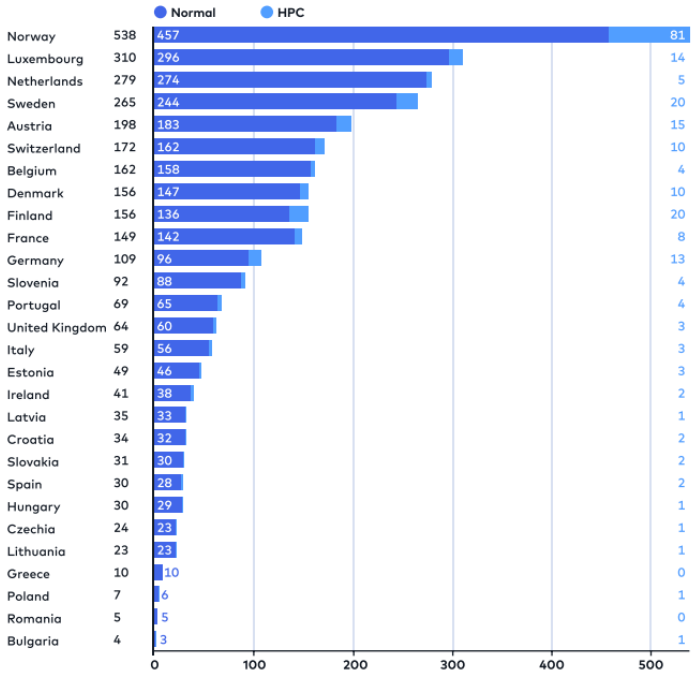
Tutkimuksen mukaan 29 %:lla kyselyyn vastanneilla suomalaisilla on tällä hetkellä käytössään pörssisähkösopimus. Kiinteähintaisten määräaikaisten sähkösopimusten määrä oli tutkimuksessa 39 % ja toistaiseksi voimassa olevilla sopimuksilla 18 %. Lopuilla kyselyyn vastanneilla oli käytössään jokin muu sähkösopimus tai he eivät osanneet sanoa. (Nordic Green Energy, 2023.)

4.4 Sähköautojen julkiset latauspisteet ja -asemat Euroopassa

On ennustettu, että sähköautot muodostavat 55 % vuotuisista ajoneuvojen myyntiluvuista vuoteen 2040 mennessä. Tämä tarkoittaisi sitä, että vuoteen 2040 mennessä sähköautojen osuus kaikista maailman autoista olisi 33 %. On kuitenkin arvioitu, että vuoteen 2040 mennessä sähköautot lisäävät loppukäyttäjien energiankulutusta noin 11 %-16 %. (D'Ettorre et al., 2022.) Sähköverkon näkökulmasta suurempi sähköajoneuvojen määrä osoittautuu lisätaakaksi, sillä niitä täytyy ladata käytön jälkeen. Sähköajoneuvojen lataustoimintaa voidaan siirtää ajallisesti, kunhan se ei aiheuta haittaa kuluttajalle. Sähköauton latauksesta voidaan tehdä aikajoustava kuorma ja tämän takia sähköajoneuvot ovat sopiva vaihtoehto kulutusjoustoon osallistumiseen. (Nandkeolyar ja Ray, 2022.) Julkiset sähköautojen latauspisteet ja -asemat voivat toimia kuluttajille järjestelmällisinä joustopalveluina. Esimerkiksi suomalainen yritys Virta on kehittänyt Suomen laajimman julkisten latauspisteiden verkoston

ja latauspisteitä on myös eri puolilla Eurooppaa. Virran julkisia latauspisteitä on mahdollista käyttää älykkäästi mobiilisovelluksen tai radiotaajuisen etätunnistuksen (RDIF, eng. Radio Frequency Identification) avulla. (Virta, n.d.-b.)

Saksalainen energiayhtiö gridX on käsitellyt sähköautojen latausinfrastruktuurin kehittymistä Euroopassa vuonna 2023 julkaistussa raportissaan. Yhtiö on koonnut tiedot raporttiin julkisesti saatavilla olevista lähteistä. Tämän takia raportissa saattaa olla joitain puutoksia, mutta raportista saadaan siitä huolimatta kattava yleiskuva latausinfrastruktuurista Euroopassa. Raportin mukaan Norja on kehittynein maa sähköliikkuvuuden osalta. Norjalla on 538 julkista latauspistettä 100 000 asukasta kohden. Latauspiste tarkoittaa raportin osalta sitä, että jokainen julkisesti saatavilla oleva sähköajoneuvoa lataava laite on laskettu latauspisteeksi. Yksittäinen latauspylväs kahdella pistokkeella varustettuna lasketaan kahdeksi latauspisteeksi. Kuva 9 havainnollistaa julkisten latauspisteiden määrää Euroopassa 100 000 asukasta kohden vuonna 2022. (gridX, 2023.)

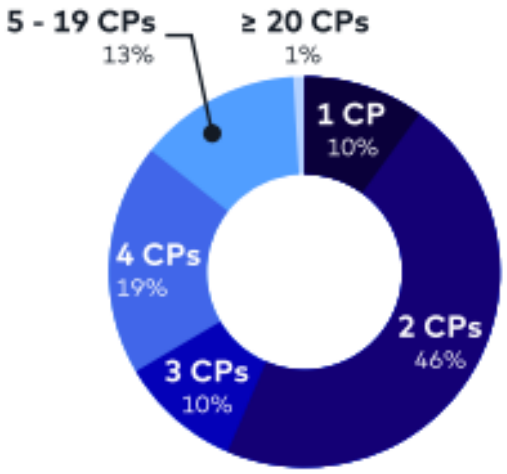


Kuva 9. Julkisten latauspisteiden määrä Euroopassa maittain vuonna 2022. (gridX, 2023.)

Kuvassa suuritehoiset laturit (HPC, eng. High Power Chargers) tarkoittaa latauspisteitä, jossa latausteho on 100 kW tai korkeampi ja normaaleilla latauspisteillä alle 100 kW. Kuvasta voidaan päätellä Pohjois- ja Keski-Euroopan olevan yleisesti edellä Etelä- ja Itä-

Eurooppaa latausinfrastruktuurin kehityksessä. Kaikki neljä Pohjoismaata ovat yltäneet Euroopan yhdeksän parhaimman maan joukkoon latauspisteiden määrän osalta. (gridX, 2023.)

Raportissa on käsitelty sähköajoneuvojen julkisia latausasemia Euroopassa, joiden määrä raportissa on yhteensä 137 258. Latausasema on määritelty paikaksi, jossa on yksi tai useampi latauspiste. Raportin mukaan vain 40 latausasemaa on varustettu Euroopassa sadalla tai sitä useammalla latauspisteellä. Vähintään 50 latauspistettä sisältävien latausasemien määrä on 210. Suurin osa latausasemista on varustettu vain kahdella latauspisteellä (46 %), joten suuremmat latausasemat ovat raportin mukaan harvinaisempia verrattuna pienempiin. Kuva 10 havainnollistaa julkisten latauspisteiden prosentuaalisia määriä latausasemilla Euroopassa vuonna 2022. (gridX, 2023.)



Kuva 10. Sähköautojen julkiset latausasemat latauspisteiden määrien mukaan Euroopassa vuonna 2022. (gridX, 2023.)

Raportin mukaan Euroopassa on 1473 julkista latausasemaa, joissa on 20 tai useampi latauspiste. Latausasemia hallinnoi 320 eri toimijaa 20:ssä eri maassa ja neljä näistä toimijoista hallitsee 50 tai useampaa latauspistettä. Näitä toimijoita ovat esimerkiksi Tesla, EVBox, Virta ja Shell. Tesla hallinnoi suurinta osaa näistä latausasemista, joiden määrä on 128. Näiden edellä mainittujen toimijoiden asemista 25 % sijaitsee Ranskassa, 16 % Norjassa ja Saksassa sekä 14 % Ruotsissa. Suurimmat latauspisteiden määrät omaavat julkiset latausasemat sijaitsevat Oslon lentokentällä Norjassa. Suuremmalla latausasemalla Oslon lentokentällä on

379 latauspistettä ja pienemmällä 348. Raportin mukaan neljä latausasemaa suurimmasta kymmenestä latausasemasta sijaitsee lähellä lentokenttiä tai rautatieasemia. Raportissa kerrotaan, että latauspisteiden määrän suuruus esimerkiksi lentokentällä selittyy pitkien pysäköimisaikojen takia. (gridX, 2023.)

5 Pohdinta ja tulevaisuuden skenaariot

Teknologian kehittyessä kulutusjoustolaitteistoja ja -palveluita tulee yhä enemmän kuluttajien saataville. Kun laitteita kehitetään entistä älykkäämmiksi, niin kotitaloudet voivat saada reaaliaikaisempaa tietoa kulutuksestaan ja osallistua kulutusjoustoon yhä merkittävämmin. Kulutusjoustoaggregoinnit kotitalouksille ovat tällä hetkellä yleisesti vain pilottitestausten tasolla, mutta tulevaisuudessa on mahdollisesti kehittymässä käytännön ratkaisuja. Reaaliaikaan ja pörssisähköön perustuvat sähkösopimukset ovat yleistyneet entistä enemmän Euroopan alueella, ja tämä helpottaa kuluttajien osallistumista aktiivisemmin kulutusjoustoon. Sähköauton latausinfrastruktuuri jatkaa kehitystään sähköautojen yleistyessä ja esimerkiksi energian siirtäminen ajoneuvosta sähköverkkoon eli V2G (eng. Vehicle-to-Grid) -teknologian käytännön ratkaisut ovat merkittävässä roolissa kulutusjoustossa tulevaisuudessa.

Smart Energy Europe ja DNV ovat yhdessä laatinut raportin (2022) simulointimallin avulla kulutusjouston tuomista hyödyistä Euroopan unionille vuonna 2030. Tutkimukseen on kehitetty simulointimalli, jonka tulokset ovat rajoittuneet tietojen laatuun, vertailukelpoisuuteen ja saatavuuteen EU:n jäsenvaltioiden kesken. DNV korostaa raportissa tutkimuksen puutteesta kulutusjouston infrastruktuuristen hyötyjen määrittämisessä sekä kannustavat olennaisten sidosryhmien jatkavan aiheen syvällisempää tutkimusta. Raportissa on myös arvioitu EU-27:n sähköntuotannon kapasiteettia sekä sähkönkulutusta vuonna 2030. EU-27 viittaa Euroopan unionin tämänhetkiseen jäsenvaltioiden määrään. Raportissa on käsitelty erilaisia kulutusjoustoteknologioita, joista mahdollinen kulutusjouston potentiaali muodostuisi EU:ssa tulevaisuudessa. Raportissa on tarkasteltu kahdeksaa erilaista teknologiaa ja näitä ovat älykäs lataus, V2G, behind-the-meter akut, teollinen kulutusjousto ja sähkölämmitys, asuintilojen sähkölämmitys, kaukolämpö sekä teollisuuden (CHP, eng. Combined Heat and Power) -lämmitys. Tutkimuksesta puuttuu joitain merkittävän potentiaalin omaavia kulutusjouston teknologioita, sillä niiden saatavuutta oli vaikea arvioida tiedon puutteen vuoksi vuoteen 2030 mennessä. Näihin teknologioihin kuuluu muun muassa kauko- ja asuinrakennusten jäähdytys sekä Joulen lämmitys (eng. Joule heating). Tutkimuksessa on arvioitu näiden kahdeksan eri teknologian tuovan yhteensä 164 GW ylöspäin joustavaa ja 130 GW alaspäin joustavaa tehoa EU-27:ssä 2030. Tässä merkittävimmät tehonjoustot tulevat juuri sähköautojen älylatauksesta, asuinrakennusten sähköisestä lämmityksestä sekä V2G-

teknologiasta. (DNV ja smartEn, 2022.) Tämä indikoi kotitalouksien valtavasta potentiaalista kulutusjouston osalta. Arviolta saataisiin noin 49 GW ylöspäin joustavaa tehoa älylatauksesta ja noin 74 GW alaspäin joustavaa tehoa asuinrakennusten sähköisestä lämmityksestä (DNV ja smartEn, 2022). On hyvin mielenkiintoista nähdä, millaisiin lukemiin on mahdollista päästä tulevaisuudessa kotitalouksien osalta laitteistoiden sekä erilaisten kuormanhallintatekniikoiden kehittyessä.

Raportissa on arvioitu sähkönkulutuksen huipun olevan 752 GW Euroopan unionissa vuonna 2030, joten ylös- ja alaspäin joustavan tehon prosentuaalinen osuus huipusta olisi noin 22 % ja 17 %. Raportissa kerrotaan joustavan tehon laskentatavan vaihtelevan tarkasteltavan teknologian mukaan, sillä kyseiset teknologiat ovat joustavia eri tavoin. Raportissa on myös laskettu potentiaalisen aktivoidun joustavuuden määrä, joka olisi 397 TWh ylöspäin ja 340 TWh alaspäin joustavaa EU-27:ssä vuonna 2030. Sähkön kokonaiskulutuksen on arvioitu olevan 4081 TWh EU-27:ssä vuonna 2030, joten ylös- ja alaspäin aktivoidun joustavuuden määrä vastaisi noin 10 % ja 8 % kokonaiskulutuksesta. Ylivoimaisesti suurin osa aktivoidusta joustosta tulisi tässäkin tapauksessa älylatauksesta sekä asuinrakennusten sähköisestä lämmityksestä. Asuinrakennusten sähköisestä lämmityksestä aktivoitu jousto olisi (ylös- ja alaspäin) noin 196 TWh ja älylatauksesta 106 TWh. (DNV ja smartEn, 2022.) Tämän perusteella myös kotitalouksilla on suuri potentiaali vaikuttaa myös aktivoidussa joustossa. Tämä voisi olla merkittävää sähköjärjestelmän luotettavuuden ja joustavuuden kannalta. Asuinrakennusten älykkäät energianhallintajärjestelmät sekä sähköajoneuvojen älykkäät latausratkaisut tulevat olemaan kasvavassa roolissa, rakennettaessa yhä energiatehokkaampaa ja joustavampaa sähköjärjestelmää tulevaisuudessa. Kuluttajien tietoisuutta on lisättävä heidän merkityksestään tulevaisuudessa sähköjärjestelmän luotettavuuden turvaamisessa, kun rakennetaan vihreää ja kestävämpää sähköjärjestelmää.

6 Yhteenveto

Kotitalouksien käytössä olevien kulutusjoustolaitteistoiden ja -palveluiden välillä on huomattavia eroja Euroopan eri maiden välillä. Varsinkin älymittareiden käyttöönotossa on ollut viivästyksiä useilla Euroopan mailla. Kansalliset lainsäädännölliset asiat ovat koituneet yleisesti ongelmakohdiksi laitteistoiden ja -palveluiden käyttöönotossa. Yleisesti Pohjoismaat ovat olleet edelläkävijöitä kulutusjoustoratkaisuissa muutamia poikkeuksia lukuun ottamatta. Pohjoismaissa spot-hintaisten sähkösopimusten määrä on lisääntynyt huomattavasti viime aikoina, kun taas joissain Euroopan maissa kiinteä- ja muuttuvahintaiset sopimukset ovat edelleen suurimmassa suosiossa kuluttajien keskuudessa. Sähköauton julkisten latauspisteiden määrä on vaihdellut yleisesti maantieteelliseen sijaintiin pohjautuen, sillä latausinfrastruktuurin kehitys on ollut huomattavasti hitaampaa esimerkiksi Itä-Euroopassa kuin Pohjoismaissa tai Keski-Euroopassa. Kulutusjoustolla on myös vaikutusta sähkömarkkinoihin ja kotitaloudet ovat suuressa osassa sähkömarkkinoiden ja -järjestelmän turvaamisessa tulevaisuudessa. Kotitaloudet voivat osallistua monilla eri tavoilla kulutusjoustoon ja merkitys korostuu entisestään uusiutuvan energian lisääntyessä Euroopan maiden sähköjärjestelmissä. Kulutusjoustolaitteistoiden ja -palveluiden saatavuus on yleisesti hyvällä tasolla Euroopassa ja tämä tarjoaa monenlaisia ratkaisuja kotitalouksille. EU:n säätämät erilaiset direktiivit ja ohjeet sekä maiden kunnianhimoiset tavoitteet ajavat Euroopan maita kohti uudenlaisia puhtaan teknologian ratkaisuja.

Kulutusjouston kokonaisvaltainen toteutus esimerkiksi potentiaaliseen joustomarkkinoiden laajuuteen ja kulutusjouston sääntelykehitykseen liittyen on ollut Keski-Euroopassa yleisesti korkealla tasolla. Euroopan maiden tavoitteelliset seikat kulutusjouston kokonaisvaltaisessa integroimisessa ovat vaikuttaneet ratkaisuiden toteutukseen ja kehitykseen. Esimerkiksi Saksan tilanteessa älymittareiden käyttöönotosta ei annettu ollenkaan vastausta, mutta potentiaalinen joustomarkkinoiden koko on yksi suurimmista Euroopassa heidän kunnianhimoisten uusiutuvien energiatavoitteiden vuoksi. Lainsäädännölliset asiat sekä tiedon puute tulevat tässäkin kontekstissa esille. Kehitystä on kokonaisuudessaan tapahtunut kulutusjouston kokonaisvaltaisessa toteutuksessa Euroopan maissa ja varsinkin Etelä- ja Itä-Euroopassa kehittyminen on ollut nousujohteista viime vuosien aikana.

Lähteet

ACER ja CEER (2023). ”Energy Retail and Consumer Protection 2023 Market Monitoring Report”. URL:https://acer.europa.eu/sites/default/files/documents/Publications/2023_MMR_Energy_Retail_Consumer_Protection.pdf. Viitattu: 7.1.2024.

Ahti, A. (2022). ”Sähkön kysyntäjouston hyödyntäminen teollisuuden LVIA-suunnittelussa”. Diplomityö. Aalto-yliopisto, Otaniemi. URL: https://aaltodoc.aalto.fi/server/api/core/bitstreams/6080316c-66f5-4922-baf8-c241e8d849f0/content.

Albadi, H, M. ja El-Saadany, F, E. (2007). “Demand Response in Electricity Markets: An overview”. IEEE Power Engineering Society General Meeting. ISSN: 1932-5517. DOI: https://doi-org.ezproxy.cc.lut.fi/10.1109/PES.2007.385728. URL: https://ieeexplore-ieee-org.ezproxy.cc.lut.fi/document/4275494.

Bosch (n.d.) “Smart radiator thermostat II”. https://www.bosch-smarthome.com/uk/en/products/devices/radiator-thermostat/. Viitattu: 12.2.2024.

Can Duman, A., Gönül, Ö., Erden, S, H. ja Güler, Ö. (2023). “Survey- and simulation-based analysis of residential demand response: Appliance use behavior, electricity tariffs, home energy management systems”. Sustanaible Cities and Society 96, s. 104628. ISSN: 2210-6707. DOI: https://doi-org.ezproxy.cc.lut.fi/10.1016/j.scs.2023.104628. URL: https://www-sciencedirect-com.ezproxy.cc.lut.fi/science/article/pii/S2210670723002391?via%3Dihub.

Crawley, J., Martin-Vilaseca, A., Wingfield, J., Gill, Z., Shipworth, M. ja Elwell, C. (2022). “Demand response with heat pumps: Practical implementation of three different control options”. Building Services Engineering Research & Technology 44. DOI: https://doi.org/10.1177/01436244221145871. URL: https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0143624422114587 1#bibr26-01436244221145871.

D’Ettorre, F., Banaei, M., Ebrahimy, R., Pourmousavi, A, S., Blomgren, V, M, E., Kowalski, J., Bohdanowicz, Z., Łopaciuk-Gonczaryk, B., Biele, C. ja Madsen, H. (2022). “Exploiting demand-side flexibility: State-of-the-art, open issues and social perspective”. Renewable and Sustainable Energy Reviews 165, s. 112605. ISSN: 1364-0321. DOI:

https://doi-org.ezproxy.cc.lut.fi/10.1016/j.rser.2022.112605. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032122005007.

DNV (n.d.). “Grid transition”. URL: https://www.dnvgl.no/research/energy/grid-transition.html. Viitattu: 5.12.2023.

DNV ja smartEn (2022). ”Demand-side flexibility in the EU: Quantification of benefits in 2030”. URL:https://smarten.eu/wp-content/uploads/2022/09/SmartEN-DSF-benefits-2030-Report_DIGITAL.pdf. Viitattu: 6.2.2024.

Energiateollisuus (n.d.). ”Tukkumarkkinat”. URL:https://energia.fi/energiatietoa/energiamarkkinat/sahkomarkkinat/tukkumarkkinat/. Viitattu: 9.1.2024.

Energinet (n.d.). “What is demand-side response?”. URL:https://en.energinet.dk/Electricity/Green-electricity/Demand-side-response/What-is-demand-side-response/. Viitattu: 4.1.2024.

Euroopan komissio (2023). ”Quarterly report on European electricity markets Q2 of 2023”. URL:https://energy.ec.europa.eu/system/files/2023-12/New_Quarterly_Report_on_European_Electricity_markets_Q2_2023.pdf. Viitattu: 7.1.2024.

Euroopan komissio (n.d.). ”Heat pumps”. URL:https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/heat-pumps_en. Viitattu: 31.1.2024

Fields, S. (2023). Päivitetty: 6.12.2023. “Critical peak pricing: What you need to know”. energysage. URL: https://www.energysage.com/electricity/critical-peak-pricing-overview/. Viitattu: 30.12.2023.

Fingrid (n.d.-a). ”Kulutusjousto”. URL:https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/markkinoiden-yhtenaisyys/sahkomarkkinoiden-kehityshankkeet/kysyntajousto/. Viitattu: 5.1.2024.

Fingrid (n.d.-b). ”Säätösähkö- ja säätökapasiteettimarkkinat”. URL:https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/saatosahko--ja-saatokapasiteettimarkkinat/. Viitattu: 15.2.2024.

Fingrid (n.d.-c). ”Taajuusohjattu käyttö- ja häiriöreservi”. URL:https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/taajuusohjattu-kaytto--ja-hairioreservi/. Viitattu: 15.2.2024.

Fortum (2021). “Kaikki mitä yrittäjän tarvitsee tietää sähkömarkkinoista”. Blogikirjoitus. URL:https://www.fortum.fi/yrityksille-ja-yhteisoille/sahkosopimus/ajankohtaista/kaikki-mita-yrittajan-tarvitsee-tietaa-sahkomarkkinoista. Viitattu: 9.1.2024.

Fortum (n.d.). “Fortum Älylataus – lataa sähköautoasi automaattisesti sähkön hinnan ollessa alimmillaan”. URL:https://www.fortum.fi/kotiasiakkaille/kampanjat-ja-lisapalvelut/alylataus?vtab=accordion-item-106081. Viitattu: 5.2.2024.

Gordic, D., Nikolic, J., Vukasinovic, V., Josijevic, M. ja Aleksic, D, A. (2023). ”Offsetting carbon emissions from household electricity consumption in Europe”. Renewable and Sustainable Energy Reviews 175, s. 113154. ISSN: 1364-0321. DOI: https://doi-org.ezproxy.cc.lut.fi/10.1016/j.rser.2023.113154. URL:https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032123000102.

gridX (2023). ”Charging report 2023”. URL:https://gridx-public.s3.eu-central-1.amazonaws.com/gridX_Charging_Report_2023.pdf?utm_medium=email&_hsmi=289426091&_hsenc=p2ANqtz-_83WQOGpY2e6wHT-vQK4kldSU5z45lhThZISBFNXlEix47uYbbemlmUkOSq9yH3FCs2_MpPvc4BvUG-TugSMjRrqzl2vJw&utm_content=289426091&utm_source=hs_automation. Viitattu: 20.1.2024.

Helen (n.d.). ”Pörssisähkö”. URL:https://www.helen.fi/sahko/sahkosopimus/porssisahko. Viitattu: 7.1.2024.

Kirkerud, G, J., Nagel, O, N. ja Bolkesjø, F, T. (2021). ”The role of demand response in the future renewable northern European energy system”. Energy 235, s. 121336. ISSN: 0360-5442. DOI: https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121336. URL: https://www-sciencedirect-com.ezproxy.cc.lut.fi/science/article/pii/S036054422101584X.

Lampimäki, S. (2021). ”SD-WAN ja sen osa nykypäivän laajaverkkoa”. Opinnäytetyö. LAB-ammattikorkeakoulu. URL: https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/502847/Lampim%C3%A4kiSamuli_Sd-wanjasenosany-kyp%C3%A4iv%C3%A4nlaajaverkkoa.pdf?sequence=2.

Latvanen, O. (2020). ”Sähkömittareiden mahdollistaman kulutusjouston tuottomahdollisuudet”. Diplomityö. Tampereen yliopisto. URL:https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/10024/121703/LatvanenOlli.pdf?sequence=5.

Myllykangas, J. (2023). “Sähkön hintavaihtelun syyt ja seuraukset Suomessa”. Kandidaatintyö. Tampereen yliopisto. URL:https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/10024/148941/MyllykangasJere.pdf?sequence=2&isAllowed=y.

Nandkeolyar, S. ja Ray, P. (2022). “Identifying households with electrical vehicle for demand response participation”. Electric power systems research 208, s. 107909. ISSN: 0378-7796. DOI: https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.107909. URL:https://www-sciencedirect-com.ezproxy.cc.lut.fi/science/article/pii/S0378779622001390.

Nordic Green Energy (2023). ”Tuore tutkimus: Pörssisähkösopimusten määrä kaksinkertaistui vuoden 2023 aikana”. URL:https://www.nordicgreen.fi/tutkimus-porssisahkosopimusten-maara-kaksinkertaistui/. Viitattu: 31.1.2024.

Oulun Energia (n.d.). ”Verkkopalveluhinnasto”. URL:https://www.oulunenergia.fi/palvelumme/sahkoverkkopalvelut/hinnastot/verkkopalveluhinnasto/#aikasahko.Viitattu: 31.1.2024.

Pallonetto, F., De Rosa, M., Milano, F. ja Finn, P, D. (2019). ”Demand response algorithms for smart-grid ready residential buildings using machine learning models”. Applied Energy 239, s. 1265-1282. ISSN: 0306-2619. DOI: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.02.020. URL:https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306261919303101.

Panda, S., Mohanty, S., Rout, K, P., Sahu, K, B., Bajaj, M., Zawbaa, M, H. ja Kamel, S. (2022). “Residential Demand Side Management model, optimization and future perspective: A review”. Energy Reports 8 s. 3727-3766. ISSN: 2352-4847. DOI: https://doi-org.ezproxy.cc.lut.fi/10.1016/j.egyr.2022.02.300. URL:https://www-sciencedirect-com.ezproxy.cc.lut.fi/science/article/pii/S2352484722005479.

Paterakis, G, N., Erdinç, O. ja Catalão, P, S, J. (2017). ”An overview of Demand Response: Key-elements and international experience”. Renewable and Sustainable Energy Reviews 69, s. 871-891. ISSN: 1364-0321. DOI:http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.167. URL:https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032116308966.

Pussinen, H. (2016). ”Tietoliikenne sähköverkossa ja sen apuna”. Opinnäytetyö. Tampereen ammattikorkeakoulu. URL:https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/106865/Pussinen_Henri.pdf?sequence=2&isAllowed=y.

Pylväläinen, E. (2021). ”Kulutusjoustomarkkinoiden- ja energianhallintajärjestelmien ratkaisut ja toimijat”. Kandidaatintyö. Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto, Lappeenranta. URL:https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/162496/kandidaatinity%c3%b6_pylv%c3%a4l%c3%a4inen_elias.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

Shi, Q., Chen, F, C., Mammoli, A. ja Li, F. (2020). ”Estimating the Profile of Incentive-Based Demand Response (IBDR) by Integrating Technical Models and Social-Behavioral Factors”. IEEE Transactions on Smart Grid Volume 11. Issue 1. s. 171-183. ISSN: 1949-3053. DOI: https://doi-org.ezproxy.cc.lut.fi/10.1109/TSG.2019.2919601. URL:https://ieeexplore-ieee-org.ezproxy.cc.lut.fi/document/8723519.

Rollert, K. (2022). “Demand response aggregators as institutional entrepreneurs in the European electricity market”. Journal of Cleaner Production 353 s.131501. ISSN: 0959-6526. DOI: https://doi-org.ezproxy.cc.lut.fi/10.1016/j.jclepro.2022.131501. URL:https://www-sciencedirect-com.ezproxy.cc.lut.fi/science/article/pii/S0959652622011222.

Salonen, M. (2021). ”Suomi osana Euroopan laajuista sähkömarkkinaa”. Kandidaatintyö. Tampereen yliopisto. URL:https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/10024/124712/Salonen-Markus.pdf?sequence=2.

Sarmala, O. (2019). ”Älykkäät sähkömittarit Euroopassa, Yhdysvalloissa ja Australiassa”. Kandidaatintyö. Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto, Lappeenranta. URL:https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/159300/kandidaatintyo_Sarmala_OOA.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

Seppälä, V. (2021). ”Sähkön myynnin hinnoittelumallit Suomessa ja Euroopassa”. Kandidaatintyö. Tampereen yliopisto. URL:https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/10024/134748/Sepp%c3%a4l%c3%a4Valtteri.pdf?sequence=2&isAllowed=y.

Smappee (n.d.-a). ”Infinity”. URL:https://www.smappee.com/infinity/. Viitattu: 12.2.2024.

Smappee (n.d.-b). ”Infinity FAQ”. URL:https://www.smappee.com/infinity/#faq. Viitattu: 12.2.2024.

Smappee (n.d.-c). ”Smappee EV Wall”. URL:https://www.smappee.com/app/uploads/2022/06/EV-Wall_Technical-specifications_EN-preview.pdf. Viitattu: 25.1.2024.

Smappee (n.d.-d). “How can I enable Smart Charging to maximize solar consumption and minimize energy costs? How does it work?”. URL:https://support.smappee.com/hc/en-gb/articles/360058893272-How-can-I-enable-Smart-Charging-to-maximize-solar-consumption-and-minimize-energy-costs-How-does-it-work. Viitattu: 25.1.2024.

Smappee (2019). “Smappee Dashboard for professionals” YouTube-video. Julkaisija: Smappee 6.8.2019. URL:https://www.youtube.com/watch?v=uO2GY-kwxBU&t=89s. Viitattu: 12.2.2024.

Smappee (2020). ”Analyse and use energy data with the Smappee Dashboard”. URL:https://www.smappee.com/blog/smappee-dashboard-energy-data/. Viitattu: 12.2.2024.

smartEn ja LCPDelta (2023). “2022 Market Monitor For Demand Side Flexibility”. URL:https://smarten.eu/wp-content/uploads/2023/02/DSF-Market-Monitor-2022.pdf. Viitattu: 13.1.2024.

Stanelyte, D., Radziukyniene, N. ja Radziukynas, V. (2022). “Overview of Demand-Response Services: A review”. Energies 15.5. DOI: https://doi.org/10.3390/en15051659. URL:https://www.mdpi.com/1996-1073/15/5/1659.

Svarc, J. (2024). ”Best Smart EV chargers”. Clean Energy Reviews. URL:https://www.cleanenergyreviews.info/blog/best-smart-ev-chargers. Viitattu: 25.1.2024.

Thermia (n.d.). “Smart Price – Pörssisähköohjaus”. URL:https://www.thermia.fi/lampopumput/porssisahkoohjaus/smart-price/. Viitattu: 1.2.2024.

Virta (n.d.-a). ”Smart charging”. URL:https://www.virta.global/smart-charging. Viitattu: 22.1.2024.

Virta (n.d.-b). ”Sähköautoilija”. URL:https://www.virta.global/fi/sahkoautoilija. Viitattu: 5.2.2024.

Vitiello, S., Andreadou, N., Ardelean, M ja Fulli, G. (2022). “Smart Metering Roll-Out in Europe: Where Do We Stand? Cost Benefit analyses in the Clean Energy Package and

Research Trend in the Green Deal". Energies 15.7. DOI: https://doi.org/10.3390/en15072340. URL:https://www.mdpi.com/1996-1073/15/7/2340.

Weigert, A., Hopf, K., Weinig, N. ja Staake, T. (2020). "Detection of heat pumps from smart meter and open data". Energy Informatics 3. DOI: https://doi.org/10.1186/s42162-020-00124-6. URL:https://energyinformatics.springeropen.com/articles/10.1186/s42162-020-00124-6.

Wärtsilä (n.d.). "Encyclopedia of Marine and Energy Technology". URL:https://www.wartsila.com/encyclopedia/term/ripple-control. Viitattu: 7.12.2023.