



# **PUSKURIAKKUJEN SOVELTAMINEN SUURITEHOISISSA SÄHKÖAJONEUVOJEN LATAUSJÄRJESTELMISSÄ**

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Sähkötekniikan koulutusohjelma, Kandidaatintyö

2025

Veikka Riipinen

Tarkastaja: TkT Ville Tikka

# Tiivistelmä

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUTin energiajärjestelmien tiedekunta

Sähkötekniikan koulutusohjelma

Veikka Riipinen

## **Puskuriakkujen soveltaminen suuritehoisissa sähköajoneuvojen latausjärjestelmissä**

Kandidaatintyö

2025

36 sivua, 14 kuvaa, 6 taulukkoa

Tarkastaja: TkT Ville Tikka

Avainsanat: puskuriakku, suurteholataus, litiumioniakku, sähköverkon kuormituksen hallinta

Tämän tutkielman tavoitteena on tutkia puskuriakkujen soveltuvuutta suuritehoisiin sähköajoneuvojen latausasemiin. Työssä tutkitaan kirjallisuuskatsauksen ja pilottihankkeiden avulla, miksi ja miten puskuriakkuja käytetään suurteholataukseen. Lisäksi arvioidaan suurteholatauksen aiheuttamia ongelmia sähköverkon kannalta, ja miten puskuriakut voivat ehkäistä niitä.

Työssä selvitetään eri akkuteknologioita sekä puskuriakkujärjestelmiä, ja litiumioniakut osoittautuvat teknisesti sopivimmiksi suurteholatauksen energianvarastointiin. Puskuriakun tukena järjestelmissä on myös mahdollista käyttää aurinkopaneeleita ja superkondensaattoreita, jotka täydentävät akuston toimintaa ja tarjoavat lisäenergiaa. Kirjallisuuskatsauksen lisäksi työssä toteutetaan puskuriakun mitoitus kahdelle suomalaiselle sähköajoneuvojen latausasemalle, joissa arvioidaan akun kokoa ja vaikutusta sähköverkon tehorojoitukseen todelliseen latausdataan pohjautuen.

Puskuriakkujen käyttö tarjoaa teknisten hyötyjen lisäksi myös potentiaalisia säästöjä sähköverkon laajennuskustannuksista ja mahdollistaa osallistumisen sähkömarkkinoille. Työ osoittaa, että puskuriakut voivat olla keskeinen osa suurteholatausinfrastruktuuria. Erityisesti alueilla, missä jakeluverkon kapasiteetti voi rajoittaa latausta.

# Abstract

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

LUT School of Energy Systems

Degree Programme in Energy Technology

Veikka Riipinen

## **Application of Buffer Batteries in High-Power Electric Vehicle Charging Systems**

Bachelor's thesis

2025

36 pages, 14 figures, 6 tables

Examiner: D.Sc. Ville Tikka

Keywords: buffer battery, high-power charging, lithium-ion battery, grid load management

The aim of this thesis is to examine the applicability of buffer batteries in high-power electric vehicle charging stations. The study investigates, through a literature review and analysis of pilot projects, why and how buffer batteries are used in high-power charging applications. In addition, it assesses the challenges that high-power charging poses to the electrical grid and explores how buffer batteries can help mitigate these issues.

The thesis reviews various battery technologies and buffer battery systems, concluding that lithium-ion batteries are the most technically suitable option for energy storage in high-power charging. It is also possible to complement the battery system with solar panels and supercapacitors, which support the operation of the battery by providing additional energy and handling short-term power peaks. In addition to the literature review, the thesis includes a sizing analysis of buffer batteries for two Finnish electric vehicle charging stations, estimating appropriate battery capacities and their impact on grid connection limits based on real-world charging data.

Beyond technical advantages, the use of buffer batteries may also offer significant cost savings by reducing the need for grid infrastructure upgrades and enabling participation in electricity markets. This study demonstrates that buffer batteries can play an important role in the development of high-power charging infrastructure, particularly in areas where distribution grid capacity may limit charging performance.

# Symboli- ja lyhenneluettelo

## Lyhenteet

BESS	Battery energy storage system
ESS	Energy storage system
HESS	Hybrid energy storage system

# Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Symboli- ja lyhenneluettelo

Sisällysluettelo	5
1 Johdanto	6
2 Suurteholataus	7
2.1 Nykytilanne . . . . .	7
2.2 Haasteet ja ratkaisut . . . . .	9
3 Puskuriakkuteknologiat	13
3.1 Puskuriakkujen tyypit . . . . .	13
3.2 Superkondensaattorit . . . . .	15
3.3 Puskuriakkujen pilottihankkeet . . . . .	17
3.4 Yhteenveto ja vertailu pilottihankkeista . . . . .	18
4 Vuorovaikutus sähköverkon kanssa ja vakaus	20
4.1 Vaikutus sähköverkkoon . . . . .	20
4.2 TEN-T-järjestelmä . . . . .	23
4.3 Puskuriakun taloudellinen kannattavuus . . . . .	24
5 Suurteholatausaseman toteutus puskuriakulla	27
5.1 Latausdatan sisältö . . . . .	27
5.2 Puskuriakun mitoitus . . . . .	27
6 Johtopäätökset	33
Lähdeluettelo	34

# 1 Johdanto

Sähköajoneuvot ovat yleistymässä kovaa vauhtia maailmanlaajuisesti. Esimerkiksi vuonna 2023 joka viides maailmalla myyty auto oli sähköauto (International Energy Agency, 2024). Kasvava sähköautokanta vaatii kuitenkin ympärilleen toimivan latausinfrastruktuurin, joka on oleellinen osa siirtymistä kohti vähäpäästöistä liikennettä. Erityisesti suurteholaturit ovat tärkeitä niiden lyhyiden latausaikojen vuoksi ja sähköautojen käytettävyyden takia. Suurteholaturien käyttö lisää kuitenkin huomattavasti paikallista tehontarvetta latausasemilla, mikä voi kuormittaa jakeluverkkoa enemmän mihin se on alun perin mitoitettu. Vaikka Suomessa on runsaasti sähköntuotanto- ja -siirtokapasiteettia, paikallisesti jakeluverkon kapasiteetti voi kuitenkin muodostua pullonkaulaksi. Ongelmaan tarjoaa potentiaalisen ratkaisun kustannustehokas puskuriakku, joka tasaisi verkon kuormitusta.

Tämän kandidaatintyön tavoitteena on tutkia käytössä olevia sähköajoneuvolataukseen tarkoitettuja puskuriakkujärjestelmiä maailmanlaajuisesti. Ne eivät ole vielä levinneet laajalti Suomeen, mutta sähköautojen yleistyminen ennakoi puskuriakkujen käytön yleistymistä myös kotimaassa. Puskuriakkujen tutkiminen on näin ollen tärkeää, jotta voidaan optimoida niiden suorituskyky, parantaa latausinfrastruktuurin tehokkuutta ja edistää sähköajoneuvojen laajamittaista käyttöönottoa. Tutkielmaa tutkitaan seuraavilla tutkimuskysymyksillä:

- Miksi puskuriakkuja käytetään suuritehoisissa latausjärjestelmissä?
- Miten puskuriakut voivat parantaa latausjärjestelmien suorituskykyä, kustannustehokkuutta ja ympäristöystävällisyyttä?
- Miten puskuriakut vaikuttavat sähköverkon vakauteen ja tehokkuuteen?

Työn toisessa luvussa käsitellään suuriteholatausta, ja mitä se vaatii sähköverkolta. Kolmannessa kappaleessa käydään läpi puskuriakuteknologioita ja pilottihankkeita maailmalta. Neljännessä kappaleessa analysoidaan puskuriakun vaikutusta sähköverkkoon. Viidennessä kappaleessa suunnitellaan latausaseman toteutusta puskuriakulla. Kuudennessa kappaleessa esitetään yhteenveto tutkimuksesta. Lisäksi tutkielman kielen- ja tekstinhuoltoon on käytetty generatiivista tekoälyä.

## 2 Suurteholataus

Jotta voidaan ymmärtää miksi puskuriakkuja käytetään suurteholatauksessa, on ensin ymmärrettävä latauksen peruseriaatteen. Tässä kappaleessa käsitellään suurteholatauksen toimintaperiaatteita ja minkälaisia haasteita siihen liittyy.

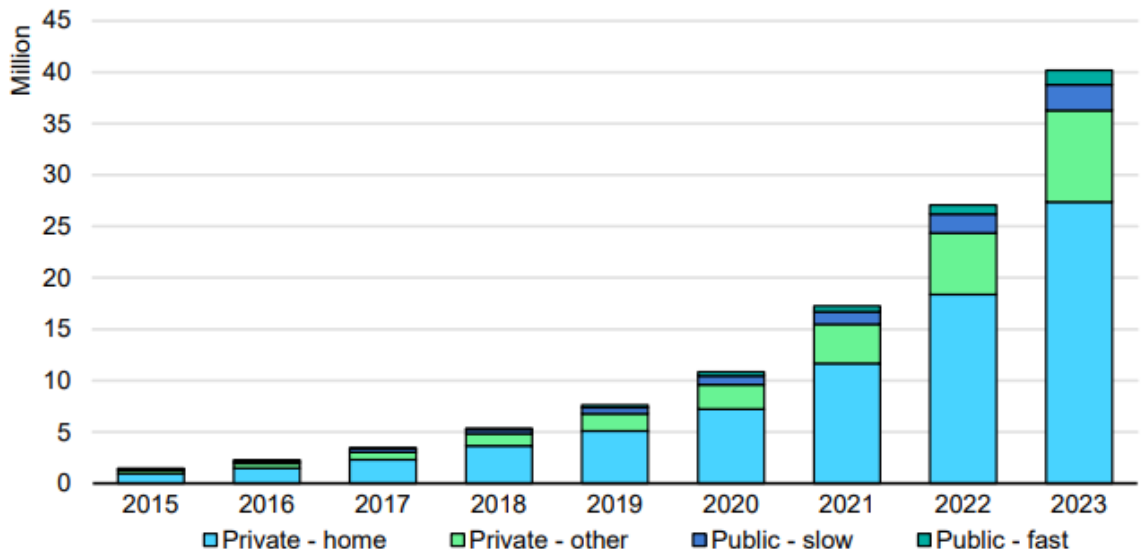
### 2.1 Nykytilanne

Sähköajoneuvojen lataustavat jaetaan neljään pääluokkaan: peruslataukseen, hidaslataukseen, tehoolataukseen ja kevyiden sähköajoneuvojen lataukseen. Peruslataus (lataustapa 3) tapahtuu vaihtosähköllä tyyppin 2 sähköautopistorasiasta, jolloin voidaan saavuttaa 43 kW latausteho. Hidaslatauksessa (lataustapa 2) sähköajoneuvo liitetään suojalaitteella varustettuun kotitalouspistorasiaan, jossa suositellaan virran rajoittamista riippuen suojalaitteesta. Tehoolatauksessa (lataustapa 4) sähköajoneuvoa ladataan tasasähköllä, jolloin lataustehot ovat tyypillisesti 50 kW:sta satoihin kilowatteihin. Kevyiden sähköajoneuvojen lataus (lataustapa 1) tapahtuu vikavirtasuojalla varustetusta kotitalouspistorasiasta, jolla voidaan ladata pienitehoista sähköajoneuvoa. (SESKO ry, 2023.)

Tehoolatausta ei pidä kuitenkaan sekoittaa suurteholataukseen, sillä ne ovat eri asia. Tehoolatauksella tarkoitetaan tyypillisesti latausta, jonka teho on 50-350 kW, mutta markkinoilla on myös tyyppin 4 latureita, joiden teho on reilusti alle 50 kW. Suurteholataus tarkoittaa taas latausta, jossa latausteho on tyypillisesti 150 kW-350 kW. Suurteholataus mahdollistaa sähköajoneuvojen todella nopeat latausajat, tyypillisesti 10-45 minuuttia riippuen autosta ja lataustarpeesta. Tämän vuoksi suurteholataus on keskeisessä osassa sähköisen infrastruktuurin kehittämisessä, erityisesti pitkän matkan liikenteen toteuttamisessa.

Sähköautolatureiden määrät ovat nousseet huomattavasti viimeisenä 10 vuoden aikana. Kuvasta 1 nähdään, että vuonna 2023 kevyiden sähköajoneuvojen latureita oli asennettu 40 miljoonaa maailmanlaajuisesti ja vuonna 2015 niitä oli alle kolme miljoonaa. Suurteholatureiden määrää on vaikea arvioida, sillä kyseisessä kuvaajassa pikalaturit ovat jaoteltu yli 22 kW latureiksi, mutta siitä saadaan silti näkemystä latureiden määrän kehityksestä. Lisäksi kuvasta huomataan, että pikalatureiden määrä on ollut hyvin pieni ennen vuotta 2021, mutta vuonna 2023 niiden määrä nousi jopa 40%.

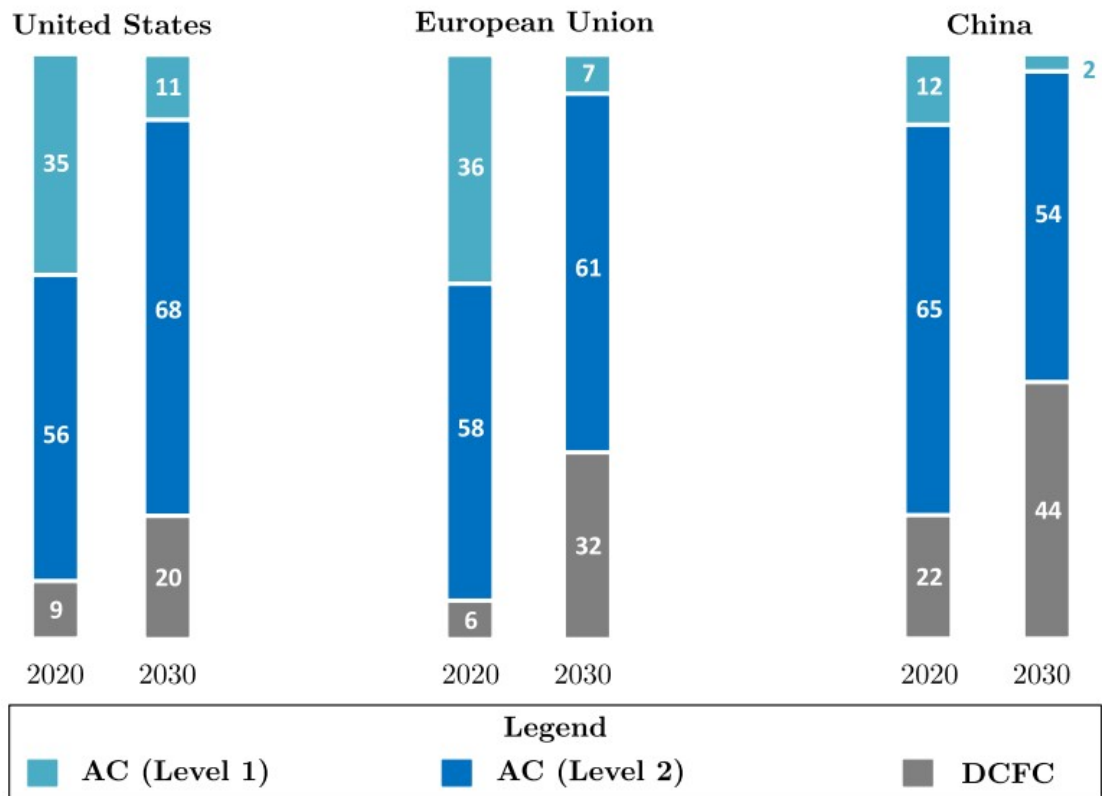
Installed public and private light-duty vehicle charging points by power rating (public) and by type (private), 2015-2023



IEA. CC BY 4.0.

Kuva 1: Kevyiden sähköajoneuvojen latauslaitteiden määrä maailmanlaajuisesti (International Energy Agency, 2024)

Pikalatauslaitteiden määrä on siis ollut prosentuaalisesti kovassa nousussa viime vuosina ja sama trendi on odotettavissa jatkuvan lähivuosina. Esimerkiksi Euroopan unionin alueella vuonna 2020 tasavirtapikalatauslaitteiden tarvitsema energian määrä vastasi 6% kaikista lataustyypeistä ja vuonna 2030 energian tarpeen odotetaan olevan 32%. Lisäksi kokonaisenergian tarve maailmanlaajuisesti sähköajoneuvojen lataukseen odotetaan kolminkertaistuvan vuosien 2025 ja 2030 välillä. (Wang et al., 2021.) Teknologian kehitys ja sääntelytoimenpiteet kuten EU:n päästötavoitteet ovat keskeisessä osassa tätä kehitystä, joten pika- ja suurteholatauslaitteiden määrän voidaan olettaa kasvavan lähitulevaisuudessa.

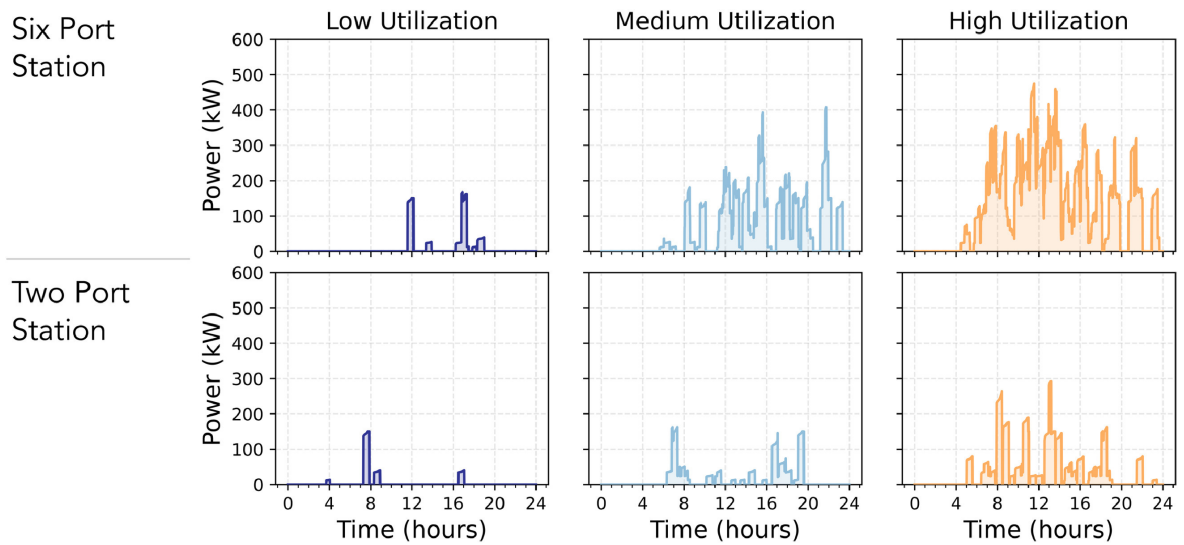


Value is given in % of total energy demand

Kuva 2: Latureiden energian tarpeen prosentuaalinen osuus vuosina 2020 ja 2030 (Wang et al., 2021)

## 2.2 Haasteet ja ratkaisut

Suurteholataukseen liittyy monia haasteita, kuten akun kestävyys ja korkeampi hinta verrattuna matalamman tehon latureihin, mutta tässä kappaleessa keskitytään sähköverkon haasteisiin. Lisäksi työssä myöhemmin tarkastellaan yksityiskohtaisemmin näitä verkon haasteita. Suurteholataus vaatii hetkellisesti suuria tehomääriä sähköverkolta, esimerkiksi melkein 500 kW pelkästään kuudella 150 kW:n laturilla, kuten kuvasta 3 nähdään. Jos latausteho tuplataan ja oletetaan käytön olevan samanlaista, suuremmilla latureilla varustetulla latausasemalla tehontarve voi olla jo yhden megawatin verran. Sähköverkon kapasiteetti ei aina yksinkertaisesti riitä tukemaan näin suuria tehoja. Suurteholatureiden määrän kasvaessa sähköverkon kuormitus suurenee entisestään. Erityisesti kaupunkialueilla, joissa sähköverkon kapasiteetti on jo valmiiksi kovalla käytöllä, suurteholatausasemat saattavat vaatia uusia sähkösyöttöjä suoraan keskijänniteverkosta. Toisaalta harvaan asutuilla alueilla pitkät etäisyydet ja rajallinen verkkoinfrastruktuuri voivat tehdä suurteholatauksen toteuttamisesta haastavaa.



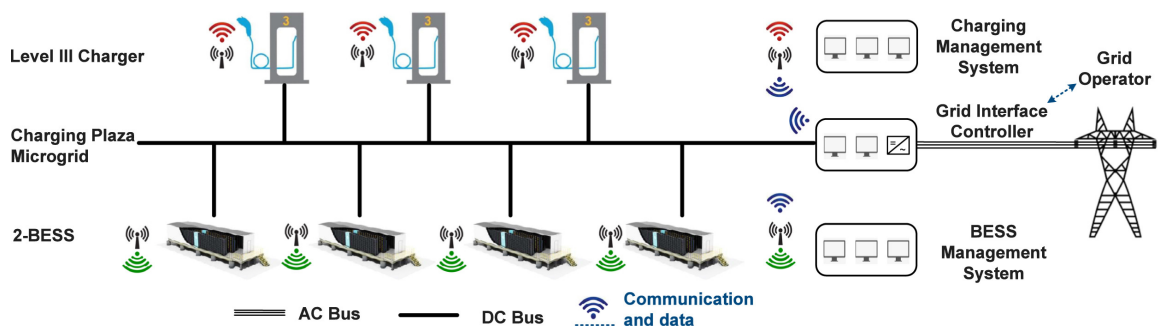
Kuva 3: 150 kW latausaseman tehonkäyttö (Gilleran et al., 2021)

Otetaan esimerkkinä tarkasteluun Suomen sähköverkon kapasiteetti. Energiayhtiöiden kapasiteetikartoista on nähtävissä paikallisesti sähköverkon kapasiteetin ja niistä voidaan karkeasti arvioida latausasemien soveltuvuutta alueille kapasiteetin riittävyyden näkökulmasta. Esimerkiksi Carunan kapasiteetikartasta nähdään, että kapasiteettia on Etelä-Suomessa osin vain megawatin verran tai ei ollenkaan (Caruna, 2024). Pohjois-Suomessa ja haja-asutusalueella kapasiteettia on vielä vähemmän. Pienen kapasiteetin alueilla suurteholatujen käyttäminen ei ole mahdollista ilman merkittäviä sähköverkon vahvistuksia. Latausasemat ovat myös usein mitoitettu siten, että kaikkien latureiden ollessa käytössä latausteho on pienempi kuin nimellisteho. Esimerkiksi 600 kW:n ja kuuden pistokkeen latausasemassa suurin saatava latausteho on keskimäärin vain 100 kW kaikkien pistokkeiden ollessa käytössä samanaikaisesti. Latausasemiin pitäisi siis saada syötettyä enemmän tehoa, mutta 600 kW:n ja 1200 kW:n asemat kuormittavat jo valmiiksi paljon sähköverkkoa.

Yksi helppo ratkaisu olisi tietenkin latausnopeuksien tiputtaminen, mutta yksi sähköajoneuvojen ongelmista verrattuna polttomoottoriautoihin on hitaampi "tankkaus". Eli todellisuudessa ratkaisuksi jää sähköverkon kapasiteetin kasvattaminen tai puskuriakkujen käyttö. Sähköverkon laajentaminen voi vaatia vuosien suunnittelu- ja rakennustyötä ja päivittäminen ei ole välttämättä järkevää pelkästään latauskuormien takia. Suurteholataus aiheuttaa hetkellisiä huippukuormia, mutta kuormitus laskee huomattavasti, kun latureita ei käytetä esimerkiksi yöllä. Puskuriakku pystyisi syöttämään latausasemaa, kun sähköverkon kapasiteetti ei riittäisi ja tasaisi tällöin huippukuormat. Kuormituksen pienentyessä esimerkiksi yöllä, puskuriakku taas latautuisi. Lisäksi Mirzan et al. 2022 tutkimuksen mukaan energiavarastoilla voidaan säästää jakeluverkon laajennuskustannuksissa jopa 66 % ja tehohäviöitä pystytään alentamaan keskimäärin 34.8 % eli puskuriakkujen käyttö voi olla halvempaa kuin sähkö-

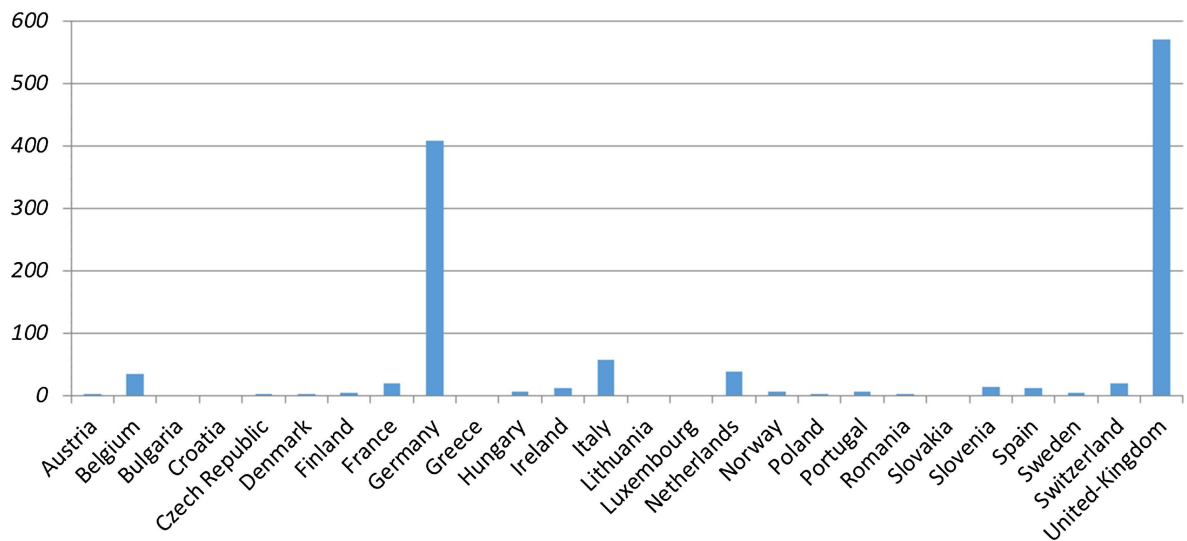
verkon päivittäminen.

Puskuriakkujärjestelmä on esitetty kuvassa 4 ja se koostuu latureista, jotka ovat yhteydessä mikroverkon kautta useampaan puskuriakkuun, joka saa virtansa sähköverkosta. Eli puskuriakut ovat latureiden kanssa omassa verkossaan erotettuna sähköverkosta. Koko järjestelmää hallitaan kolmella eri säätimellä, jotka mahdollistavat puskuriakkujärjestelmän optimaalisen toiminnan.



Kuva 4: Yksinkertaistettu kuva puskuriakkujärjestelmästä sähköajoneuvojen lataukseen (Cui et al., 2022)

Akkuenergiavarastoja on jo käytössä monissa maissa, kuten Iso-Britanniassa, Saksassa ja Yhdysvalloissa, joissa niitä hyödynnetään erityisesti uusiutuvan energian varastointiin ja sähköverkon kuormituksen hallintaan. Kuvasta 5 nähdään, että Euroopan maista erityisesti Iso-Britanniassa ja Saksassa energiavarastoja on asennettu huomattavan paljon, jopa satoja megawatteja. Sekä Iso-Britanniassa että Saksassa energiavarastojen ensisijaisena käyttötarkoituksena on osallistuminen taajuuden vakauttamiseen tarkoitetuille reservimarkkinoille. Akut mahdollistavat nopean vasteajan, sekä niiden avulla erillisiä varavoimalaitoksia ei tarvitse käynnistää taajuuden säätöön. Nämä kantaverkon tukemiseen käytetyt akkuenergiavarastot eroavat kuitenkin koonsa puolesta suurteholataukseen käytettävistä puskuriakkujärjestelmistä. Puskuriakun tarkoitus on tukea yksittäistä latausasemaa, kun taas kantaverkon tukemisessa akku syöttää laajempaa sähköverkkoa.



Kuva 5: Käytössä olevien akkuenergiavarastojen (BESS) asennettu kokonaisteho (MW) Euroopan maissa (Hu, Armada & Jesús Sánchez, 2022)

Puskuriakut ovat siis erinomainen ratkaisu suurteholatauksen aiheuttamiin kulutushuippuihin sähköverkossa ja tarjoavat muitakin tarpeellisia ominaisuuksia. Esimerkiksi puskuriakkuja voidaan käyttää energiavarastona uusiutuville energianlähteille ja osallistua reservimarkkinoille. Sähkön hinnan ollessa halpaa akut voidaan ladata ja myöhemmin sähkön voi myydä korkeammalla hinnalla verkkoon. Puskuriakkujen avulla ei siis haittaa, vaikka kulutus ei osuisi pörssisähkön halvoille tunneille. Kuvan 3 mukaan suurteholataus osuu juuri pörssisähkön kalleimmille tunneille eli aamulle ja iltapäivälle.

### 3 Puskuriakkuteknologiat

Tässä luvussa esitellään yleisimmät puskuriakkujen tyypit ja vertaillaan niitä. Erityyppisillä akuilla on erilaiset ominaisuudet ja monesta eri näkökulmasta tarkastamalla saadaan esille kunkin hyvät ja huonot puolet. Lisäksi luvussa käydään läpi pilottihankkeita ympäri maailmaa.

#### 3.1 Puskuriakkujen tyypit

Energiaa voidaan varastoida mekaanisesti, lämpöenergiaan, kemiallisesti tai sähköisesti akkuihin. Käytännöllisyyden vuoksi sähköajoneuvojen lataukseen käytetään puskuriakkuja, sillä ne tarjoavat korkean energiatehokkuuden, kompaktin koon ja nopean vasteajan. Lisäksi puskuriakkujärjestelmiin on mahdollista liittää lisätehonlähteitä, kuten aurinkopaneeleita tai superkondensaattoreita. Taulukosta 1 tarkastellaan yleisempien akkutyyppeihin liittyviä ominaisuuksia ja kuvasta 6 havainnollistetaan energianvarastointiin käytössä olevia ja asennettuja akkuja.

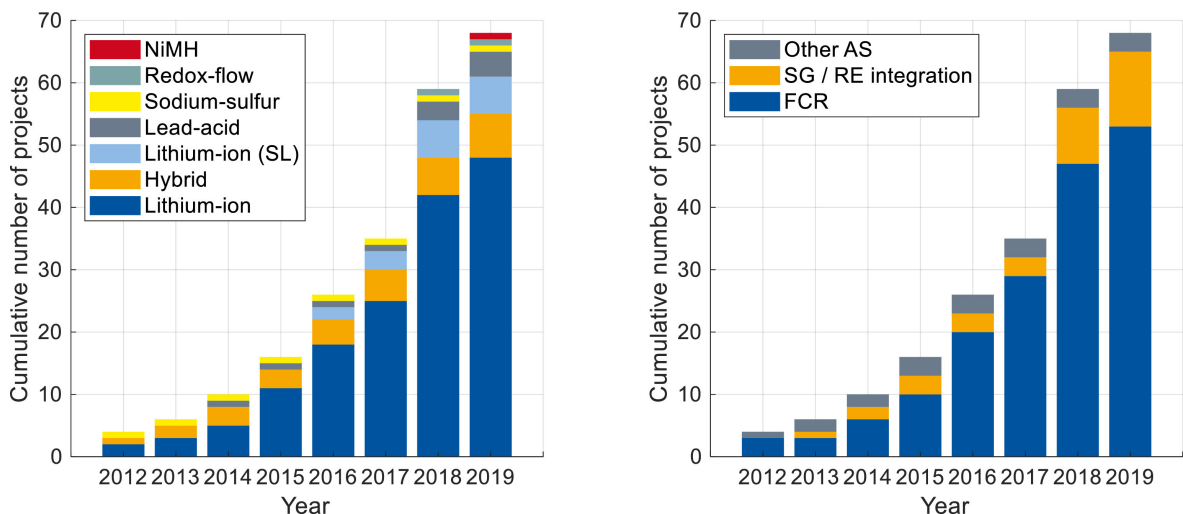
Taulukko 1: Tyypillisempien akkujen ominaisuuksia (Nazariadeh et al., 2024)

Battery Type	Lead-Acid	Ni-Cd	Ni-MH	Zn-Br	Fe-Cr	Li-ion	NaS	NaNiCl	VRFB	ZBFB
Energy Density (Wh/L)	50–80	60–150	40–80	65–75	20–35	200–400	140–300	160–275	25–33	55–65
Power Density (W/L)	10–400	80–600	250–1000	250–1000	100–600	1500–10,000	140–300	150–270	1–2	1–25
Cell Voltage (V)	2	1.3	1.2	1.67	1.18	4.3	2.08	2.85–3.1	1.4	1.8
Round Trip Efficiency	82%	83%	70%	70–80%	97.4%	95%	80%	84%	70%	70%
Depth of Discharge	50%	85%	100%	100%	100%	95%	100%	100%	100%	100%
Operating Temp (°C)	–20–60	–40–60	–20–60	–20–60	–20–60	–20–60	300–350	–70–100	10–40	20–50
Charge Efficiency	79%	70%	70%	73%	97.4%	100%	90%	80–95%	97%	70–80%
Energy Efficiency	70%	69–90%	75%	80%	66%	80%	90%	95%	72.3%	82%
Voltage Efficiency	80%	75%	70%	80%	82%	98%	87%	80.9%	74.5%	83%
Life Cycle	1500	2500	800–1200	4000	2000	10,000	3000	3000	13,000	10,000
Cost (USD/kWh)	105–475	400	100–500	170–580	290	200–1260	263–735	315–488	315–1050	525–1680

Käydään seuraavaksi läpi käytössä olevia akkutyyppejä energiavarastointiin, jotka löytyvät kuvasta 6. Lyijyakkujen hyödyt ovat niiden alhainen hinta ja yksinkertainen rakenne, mutta ne ovat raskaita ja omaavat pienen energia- ja tehottiheyden. Jotta lyijyakut tuottaisivat saman tehon kuin litiumioniakut, niiden pitäisi olla moninkertaisesti suurempia, mikä ei ole käytännöllistä jo valmiiksi lyijyakkujen raskaan painon vuoksi. Vaikka edellisessä taulukossa puhutaan 1500 syklin eliniästä, Olabain et al. 2024 artikkelin mukaan lyijyakut kestävät vain 260–1500 lataussykliä. Lyijyakut ovat siis liian raskaita, tehotomia ja lyhytikäisiä puskuriakkusovelluksiin. Niitä kuitenkin käytetään energiavarastoina edullisuuden ja yksinkertaisuuden vuoksi.

Nikkelimetallihybridiaakku (NiMH) on ominaisuuksiltaan hieman parempi kuin lyijyakku. Sen tehotiheys on huomattavasti suurempi, esimerkiksi litran kokoinen NiMH-akku voi tuottaa 1 kW tehoa, kun taas samankokoinen lyijyakku yltää parhaillaan vain 400 W:iin. Energia- tiheys on kuitenkin yhtä pieni kuin lyijyakulla, eli akuista pitää tehdä 5-10 kertaa suurempia kuin korkean energiatihedden omaavilta akuilta. Lataussyklejä NiMh-akku kestää vain 800-1200, mutta hinnaltaan ne ovat halpoja. Eli suorituskyvyltään ja eliniältään NiMh-akku ei ole paras vaihtoehto, mutta hinnan puolesta hyvin kilpailukykyinen.

Natrium-rikkiakku (NaS) tarjoaa tasapainoisen yhdistelmän ominaisuuksia, mutta ei omaa erityistä vahvuutta. Energia- ja tehotiheys ovat samat 140-300 Wh/L ja W/L, eli eivät matalimmasta tai korkeimmasta päästä. Hyötysuhteltaan natrium-rikkiakku pääsee melkein litiumioniakun tasolle ja lataussyklejä kestää tuplasti enemmän kuin lyijy- tai nikkelimetallihybridiaakku. Suurin ero muihin akkuihin verrattuna on korkea käyttölämpötila (300-350 °C), joka vaatii akustoon erillisen lämmitysjärjestelmän ja lisää järjestelmän monimutkaisuutta ja kustannuksia. NaS-akun ominaisuudet eivät siis ole riittävän kilpailukykyiset verrattuna litiumioniakkuihin, jotta sen käyttö olisi perustelua energiavarastona.



Kuva 6: Saksassa vuosien 2012 ja 2019 välillä asennetut suuret akkujärjestelmät (Figgenger et al., 2021)

Redox-virtausakkuja on alettu käyttämään Saksassa vuonna 2018 energianvarastointiin, ja ne perustuvat nestemäisiin elektrolyytteihin. Virtausakussa elektrolyyttejä pumpataan elektrolyyttisäiliöstä akkukennojen läpi ja kapasiteettia voidaan kasvattaa suurentamalla säiliötä, joka mahdollistaa helpon energianvarauskapasiteetin nostamisen. Virtausakut voivat kestää jopa yli 10 000 lataussykliä, joka mahdollistaa erittäin pitkän käyttöiän. Virtausakuilla on kuitenkin todella alhainen tehotiheys (1-25 W/L), jolloin niiden täytyy olla jopa 400 kertaa suurempia kuin litiumioniakut saavuttaakseen vastaavan tehon. Tämän vuoksi ne eivät ole optimaalisia suurteholatauksen tukemiseen, jossa tarvitaan tehoa kompaktissa muodossa

kaupunkialueilla tai huoltoasemilla. Virtausakkujen käyttökohteena onkin uusiutuvan energian pitkäaikaisempi varastointi ja sähköverkon tasapainotus.

Todellisuudessa suurin osa energiavarastoina käytettävistä akuista on litiumioniakkuja. Verrattuna muihin akkuteknologioihin, niiden lataussyklien määrä sekä energia- ja tehotehiys ovat selvästi parempia, moninkertaisia joissakin tapauksissa. Näiden ominaisuuksien takia ne ovat käytetyin akkuvarastotyyppi Saksassa vuosien 2012 ja 2019 välillä, kuten kuvasta 6 nähdään. Vaikka suurin osa näistä akuista on käytössä taajuudenhallintareservinä (FCR), voidaan olettaa niiden sopivan myös sähköajoneuvojen lataukseen liittyviin sovelluksiin. Litiumioniakkuja on montaa eri tyyppiä ja niistä yleisimmät ovat LFP, NMC, NCA, LCO ja LMO. Näistä akkutyypeistä litium-rautafosfaattiakku (LFP) omaa parhaimmat ominaisuudet akkuvarastoksi, koska sillä on pitkä käyttöikä, korkea energiatehiys ja erinomainen turvallisuus (Gerold et al., 2023).

### 3.2 Superkondensaattorit

Puskuriakkujärjestelmissä on myös mahdollista käyttää superkondensaattoreita akkujen kanssa. Superkondensaattorit tarjoavat erittäin korkean tehotehiyden (13 kW/kg) sekä lähes välittömän lataus- ja purkuajan (0.3-30s), kuten kuvasta 2 nähdään. Nämä ominaisuudet tekevät superkondensaattoreista erinomaisia suuritehoisiin ja lyhytaikaisiin sovelluksiin. Puskuriakkujärjestelmässä superkondensaattorit tasaavat teho- ja virtapiikkejä, jolloin ne voivat vähentää akkujen kuormitusta ja joissakin tapauksissa hidastaa akun kulumista pidentäen niiden elinikää (A. G. Olabi et al., 2022). Esimerkiksi useamman laturin kytkeminen päälle samanaikaisesti voisi aiheuttaa suuren tehopiikin puskuriakkujärjestelmään, mutta superkondensaattoreilla tämän kuormituksen voisi tasata suotuisammaksi akuille.

Superkondensaattorit, jotka tunnetaan myös nimellä ultrakondensaattorit, toimivat varastoimalla sähkövarauksen elektrodi- ja elektrolyyttipinnan välille muodostuvaan sähköiseen kaksoiskerrokseen (A. G. Olabi et al., 2022). Eli toisin kuin akut, jotka perustuvat kemiallisiin reaktioihin, superkondensaattorit varastoivat energiaa fysikaalisesti. Tämä mahdollistaa huomattavasti pidemmän eliniän verrattuna akkuihin ja paremman syklinkestävyyden. Yksi superkondensaattorien heikkouksista on kuitenkin niiden alhainen energiatehiys ja nopea purkaus aika, minkä vuoksi ne eivät sovellu pitkäaikaiseen energiansyöttöön. Tästä huolimatta ne ovat erinomainen ratkaisu puskuriakkujärjestelmiin, joissa tarvitaan nopeaa latausta ja lyhytaikaista tehon tasausta.

Superkondensaattorit voidaan jakaa kolmeen eri ryhmään; sähköisen kaksoiskerroksen-, pseudo- ja hybridikondensaattoreihin. Näistä hybridikondensaattorit (HSCs) soveltuvat parhaiten puskuriakkujärjestelmiin, sillä ne yhdistävät pseudo-(PCs) ja sähköisen kaksoiskerroksen kon-

densaattorien (EDLCs) parhaat ominaisuudet. Pseudokondensaattorien vahvuus on korkea energiatiheys, mutta niiden heikkous on huono tehotiheys ja syklinkesto. Sähköisen kaksoiskerroksen kondensaattorien parhaat puolet ovat erinomainen tehotiheys ja syklinkesto, kun taas niiden heikkous on matala energiatiheys. Eli hybridikondensaattorit yhdistävät pseudokondensaattorien korkean energiatiheyden ja sähköisen kaksoiskerroksen kondensaattorien erinomaisen tehotiheyden sekä pitkän syklinkeston.

Taulukko 2: Superkondensaattorien ja ladattavien litiumioniakkujen ominaisuuksien vertailu (A. G. Olabi et al., 2022)

<b>Characteristics</b>	<b>Supercapacitors</b>	<b>Lithium-ion batteries</b>
Cycle life	<500,000	800–3000
Power density (kW/kg)	13	0.5–1
Energy density (Wh/kg)	0.5–30	70–100
Cycle efficiency (%)	98	Up to 95
Charge/discharge time	0.3–30 s	0.3–3 h
Capital cost (\$/kWh)	300–2000	600–2500
Durability (years)	<20	14–16

Taulukosta 2 nähdään, että superkondensaattoreiden purkuaika on tyypillisesti 0.3-30 s suurilla tehokuormilla, mikä rajoittaa niiden käyttöä energiavarastona. Hitaammalla purk nopeudella käyttöaika voidaan pidentää, mutta samalla teho pienenee huomattavasti. Tämän vuoksi niitä usein käytetään yhdessä akkujen kanssa, jolloin akku toimii pääasiallisena energiavarastona ja superkondensaattorit täydentävät järjestelmää. Superkondensaattorit pystyvät tasaamaan korkeimmat tehopiikit ja akut suorittavat itse suurteholatauksen pidempiaikaisen syöttämisen. Näitä superkondensaattorien ja akkujen yhdistelmää kutsutaan hybridienergianvarastointijärjestelmäksi (HESS), jossa on yhdistettynä molempien teknologioiden vahvuudet. HESS-järjestelmä on kuitenkin hieman monimutkaisempi kuin pelkkä BESS-järjestelmä, jolloin se voi olla hintavampi ja vaatia kehittyneemmän hallintajärjestelmän. Jos latausasemassa ei esiinny merkittäviä tehopiikkejä, jotka eivät lyhennä huomattavasti akuston elinikää, superkondensaattoreita ei ole välttämättä kannattavaa hankkia.

### 3.3 Puskuriakkujen pilottihankkeet

Kuten aiemmin työssä on mainittu, puskuriakkujärjestelmiä suurteholataukseen on kehitetty ja testattu jo useissa maissa, ja tässä kappaleessa on tarkoitus käydä niitä läpi. Tarkasteluun on otettu mukaan sekä käytännössä toteutettuja pilottihankkeita, että mallinuksiin perustuvia simulaatioita. Tarkoituksena on hahmottaa, minkälaisia akku- ja aurinkopaneelilyhdistelmiä on hyödynnetty kuormien tasaamiseksi ja sähköverkon tukemisessa.

Vuonna 2022 Tanskassa toteutettiin pilottihanke, jossa kaksi 175 kW tehoista suurteholaturia sai energiansa kolmesta 104 kWh akusta sekä 61 kWp aurinkopaneelijärjestelmästä. Sähköverkkoliitännä oli jaettu kolmeen tasoon: 44 kW, 22 kW ja 11 kW. Pilotin tarkoitus oli tutkia suurteholatausta rajoitetun sähköverkon alueella ja arvioida kuinka hyvin BESS ja aurinkopaneelit voivat tukea latausta. Tutkimus osoitti, että akku ja aurinkopaneelit mahdollistivat lähes kaikki testin lataustarpeet 11 kW verkkoliitännällä. (Bowen et al., 2022.)

Yhdysvalloissa toteutetussa vuoden 2023 simulaatiotutkimuksessa arvioitiin puskuriakkujen vaikutusta neljän ja kahdeksan 300 kW latauslaitteen järjestelmässä. Molemmissa simulaatioissa päivän tehopiikki (800 kW ja 1200 kW) oli noin puolet nimellistehosta (1200 kW ja 2400 kW). Tutkimuksessa mallinnettiin kahden eri kokoisen akun käyttöä (711.1 kWh ja 1209.3 kWh) yhdistettynä aurinkovoimajärjestelmiin (22.89 kWp ja 35.97 kWp). Puskuriakulla sähköverkon käyttö pystyttiin rajoittamaan 300 kW neljän laturin järjestelmässä ja 600 kW kahdeksan laturin järjestelmässä. Simulaatio osoitti, että puskuriakuilla voidaan vähentää merkittävästi latausasemien sähkönostokustannuksia (-50.4 % ja -53.3 %). (Wu, Bhat & Chen, 2023.)

Kolmannessa esimerkissä, Alankomaissa vuonna 2022 tehdyn simulaation perusteella arvioitiin neljän 50 kW:n laturin toimintaa puskuriakkujärjestelmän yhteydessä. Järjestelmässä käytettiin 500 kWh akkua ja 500 kWp aurinkovoimaa, jotka olivat liitettynä keskijänniteverkkoon. Sähköverkon kapasiteettia ei oltu erikseen mainittu, joten sen voidaan olettaa keskijänniteverkolle olevan megawatin luokkaa. Simulaation tarkoitus oli tutkia BESS:n taloudellista kannattavuutta sekä verkkokuormituksen hallintaa. Puskuriakulla saatiin 30 % pienemmät liittymismaksut, sekä järjestelmällä osallistuttiin 320 kertaa verkkotaajuuden säätöön ja day-ahead markkinoille. (Argiolas et al., 2022.)

Alankomaissa Amsterdamissa vuonna 2024 toteutettiin pilottihanke, jossa tutkittiin puskuriakun (BESS) käyttöä AC-latauskeskuksessa. Pilottihanke oli tehty yhteistyössä Vattenfallin ja Heijmansin kanssa Park and Ride (P&R) alueelle. P&R-alue tarkoittaa aluetta, johon ajetaan omalla autolla ja jatketaan matkaa julkisella liikenteellä. Pilottihankkeessa oli käytössä kahdeksan 24.2 kW laturia, sekä 336 kWh puskuriakku. Järjestelmää syötti 55.4 kW suurui-

nen sähköverkko. Toisin kuin muut pilottihankkeet, tässä ei ollut ollenkaan aurinkopaneeleita mukana. (Heath, Wolbertus & Heller, 2024.)

Vuonna 2021 Saksassa tehdyssä R&D pilottihankkeessa tutkittiin suurteholatausta 100 kW verkkosyötöllä. Hankkeen tarkoitus on mahdollistaa yli 400 kW lataus, sillä useilla alueilla sähköverkko rajoittaa latauksen vain 100 kW. Käytössä oli siis yksi tai useampi laturi, joiden yhteen laskettu teho oli 400 kW tai yli. Puskuriakun kokoa ei ole kerrottu artikkelissa, mutta sen koko on todennäköisesti satoja kilowattitunteja muiden pilottihankkeiden perusteella. Hankkeessa ei myöskään oltu käytetty aurinkopaneeleita, tähän saattoi vaikuttaa se, että pilotin tarkoitus oli tutkia suurteholatausta sähköverkon toimiessa rajoitteena. Aurinkopaneelit tarvitsevat myös paljon tilaa ja tämä voi olla rajoittava tekijä niitä hankkiessa varsinkin jos latausasema on kaupunki- tai taajama-alueella. (Drews-Walkling, Kerssen & Tiedemann, 2021.)

Taulukko 3: Puskuriakkupilottien ja -simulaatioiden vertailu

Hanke	Vuosi	Laturit	Akku	PV	Verkko	Käyttötarkoitus
Tanska	2022	2 × 175 kW	3 × 104 kWh	61 kWp	44/22/11 kW	Lataus rajoitetulla verkolla
USA	2023	4/8 × 300 kW	711/1209 kWh	23/36 kWp	300/600 kW	Huipputehon rajoitus
Alankomaat	2022	4 × 50 kW	500 kWh	500 kWp	Useita MW	Verkkokuorman hallinta
Alankomaat	2024	8 × 24.2 kW	336 kWh	–	55.4 kW	Lataus rajoitetulla verkolla
Saksa	2021	400 kW	Satoja kWh	–	100 kW	Suurteholataus rajoituksin

### 3.4 Yhteenveto ja vertailu pilottihankkeista

Pilottihankkeiden ja simulaatioiden katsauksesta voidaan havaita, että puskuriakkuja on hyödynnetty monenlaisissa sähköajoneuvojen latausjärjestelmissä. Vaikka tämän työn tarkoitus on tutkia puskuriakkujen käyttöä suurteholatauksessa, niitä oli myös käytetty DC-latauksen lisäksi hitaammassa AC-latauksessa. Tämä kertoo, että puskuriakkujen käyttö ei rajoitu pelkästään suurteholataukseen ja lisää niiden mahdollisia käyttökohteita. Työn alussa käytiin läpi sähköajoneuvojen latureiden määrää ja suurin osa niistä on AC-latureita, vaikka DC-latureiden määrä on ollut pienessä nousussa viime vuosina. Pilottihankkeiden latausasemien kokonaistehot vaihtelivat siis 200 kW ja 2400 kW väliltä, ja latureiden tehot olivat 24.2 kW ja 300 kW väliltä.

Useimmissa pilottihankkeissa ei tarkemmin käyty läpi puskuriakkujen tyyppejä ja kemioita. Tämä voi johtua siitä, että piloteissa haluttiin keskittyä enemmän järjestelmän kokonaistoinnallisuuteen, kuten tehonhallintaan, kustannuksiin ja sähköverkon tukemiseen. Puskuriakut tulevat myös hyvin todennäköisesti erilliseltä valmistajalta, jonka tehtävänä on valita

sopivin akku pilotista saatujen teknisten vaatimusten mukaan. Näitä vaatimuksia ovat esimerkiksi teho (kW), kapasiteetti (kWh) ja syklien määrä. Tällä hetkellä litiumioniakkua voidaan pitää oletusteknologiana, sillä kuten aiemmin työssä huomattiin, litiumioniakuilla on kaikista akkutyypeistä parhaat ominaisuudet.

Aurinkopaneelien käytettävyys vaihteli huomattavasti pilottihankkeiden ja simulaatioiden välillä. Joissakin hankkeissa ne olivat keskeisessä osassa järjestelmää ja kahdessa pilottihankkeessa niitä ei käytetty ollenkaan. Syitä paneelien käyttämättömyyteen oli monia, esimerkiksi latausaseman maantieteellinen sijainti voi rajoittaa huomattavasti paneelien käyttöä. Lisäksi Heath et al. 2024 mukaan, jotta aurinkopaneelijärjestelmällä olisi merkittävä vaikutus pikalataukseen, niiden tulisi olla kooltaan 0.5 MWp ja 20 MWp väliltä. Näin suurten paneelien asentaminen esimerkiksi P&R-alueelle kaupunkiin on todella haastavaa, eli aurinkopaneelit soveltuisivat paremmin huoltoasemille valtateiden varrelle.

Aurinkopaneelit olivat mukana maantieteellisesti avoimilla alueilla, joissa paneelien asentamiselle oli tarpeeksi tilaa ja hankkeissa, joissa ne oli koettu tarpeelliseksi. Alankomaisissa vuonna 2022 tehdyssä simulaatiossa käytössä oli jopa 500 kWp aurinkopaneelikenttä, jonka avulla pystyttiin osallistumaan sähkömarkkinoille ja yhdistämään BESS kaupalliseen käyttöön. Tanskassa pilottihankkeessa oli 61 kWp aurinkopaneelit ja Yhdysvaltojen simulaatiossa oli 22.9 kWp ja 36.0 kWp paneelijärjestelmät. Näiden hankkeiden perusteella ei voida kuitenkaan suoraan yleistää, mikä aurinkopaneelikentän kokoluokka on riittävä puskuriakkujärjestelmän tukemiseksi. Mitoitus riippuu usein latauskentän koosta, puskuriakun kapasiteetista sekä aseman kuormitusprofiilista.

Pilottihankkeiden ja simulaatioiden perusteella ei ole yksiselittäisestä ovatko aurinkopaneelijärjestelmät kannattavia puskuriakkujärjestelmissä. Niiden puolesta ja vastaan on monia tutkimuksia, esimerkiksi Tanskan pilottihankkeen perusteella 61 kWp aurinkopaneeleista riittää tarpeeksi tehoa tukemaan pikalatausta. Vuoden 2024 Alankomaiden simulaation mukaan vasta 0.5 MWp aurinkopaneelit ovat tarpeeksi suuret puskuriakkujärjestelmään. Eli aurinkopaneelijärjestelmän soveltuvuus ja kannattavuus täytyy laskea aina tapauskohtaisesti kunkin latausaseman kokoonpanon perusteella.

Sähköverkkojen syötöt erosivat todella paljon hankkeiden välillä. Pienin syöttö oli vain 11 kW Tanskan pilottihankkeessa ja Alankomaiden simulaatiossa puskuriakkujärjestelmä oli kytkettynä keskijänniteverkkoon ilman syötön rajoitteita eli tehoksi voidaan olettaa silloin olevan useita megawatteja. Suurin osa piloteista oli kuitenkin toteutettu rajoitetun verkon alueella eli sähköverkko ei itsessään pystynyt tukemaan latausta.

## 4 Vuorovaikutus sähköverkon kanssa ja vakaus

Tämän kappaleen tarkoitus on tarkastella suurteholatauksen vaikutuksia sähköverkkoon ja kuinka puskuriakku voi tasata niitä. Lisäksi kappaleessa tarkastellaan TEN-T (Trans-European Transport Network) -verkostoa ja sitä, miten puskuriakkuja voidaan hyödyntää sähköajoneuvojen suurteholatausinfrastruktuurin kehittämisessä. Lisäksi lopuksi tutkitaan puskuriakkujärjestelmän taloudellista käyttöä sähköajoneuvojen latausasemien yhteydessä.

### 4.1 Vaikutus sähköverkkoon

Puskuriakkujen (BESS) integrointi sähköajoneuvojen suurteholatausasemille tarjoaa useita etuja sähköverkon kannalta. Tässä kappaleessa on tarkoitus käydä tarkemmin läpi näitä etuja ja kuinka ehkäistä suurteholatauksen aiheuttamia haasteita. Sähköajoneuvojen latauksen aiheuttamia haasteita on kuvattu taulukossa 4 ja niitä ovat verkon huippukuormituksen nousu, josta aiheutuu suurentuneita muuntajakuormia, jännitevaihtelua ja korkea PAR-arvo. PAR (Peak-to-Average Ratio) tarkoittaa huippu- ja keskitehon suhdetta, eli arvo vertaa hetkellistä huipputehoa keskimääräiseen tehoon. Mitä suurempi PAR-arvo on, sitä enemmän kuormitus vaihtelee ja arvon ollessa lähellä yhtä verkon kuormituksen vaihtelu on todella vähäistä. Lisäksi Mogos & Grillon 2021 tutkimuksen mukaan muuntajan maksimikuormitus on vuonna 2030 talvella 99.99 % ja muutkin kuormitukset ovat huomattavasti suurentuneet verrattuna vuoteen 2025 tai 2020. Ilman kuormituksen optimointia suurteholataus aiheuttaa siis merkittäviä ongelmia sähköverkolle ja pelkkä optimointi ei kokonaan poista haasteita.

Taulukko 4: Muuntajakuormituksen ja tehon vertailu eri sähköautojen kuormitusskenaarioissa kesällä ja talvella (Mogos & Grillo, 2021)

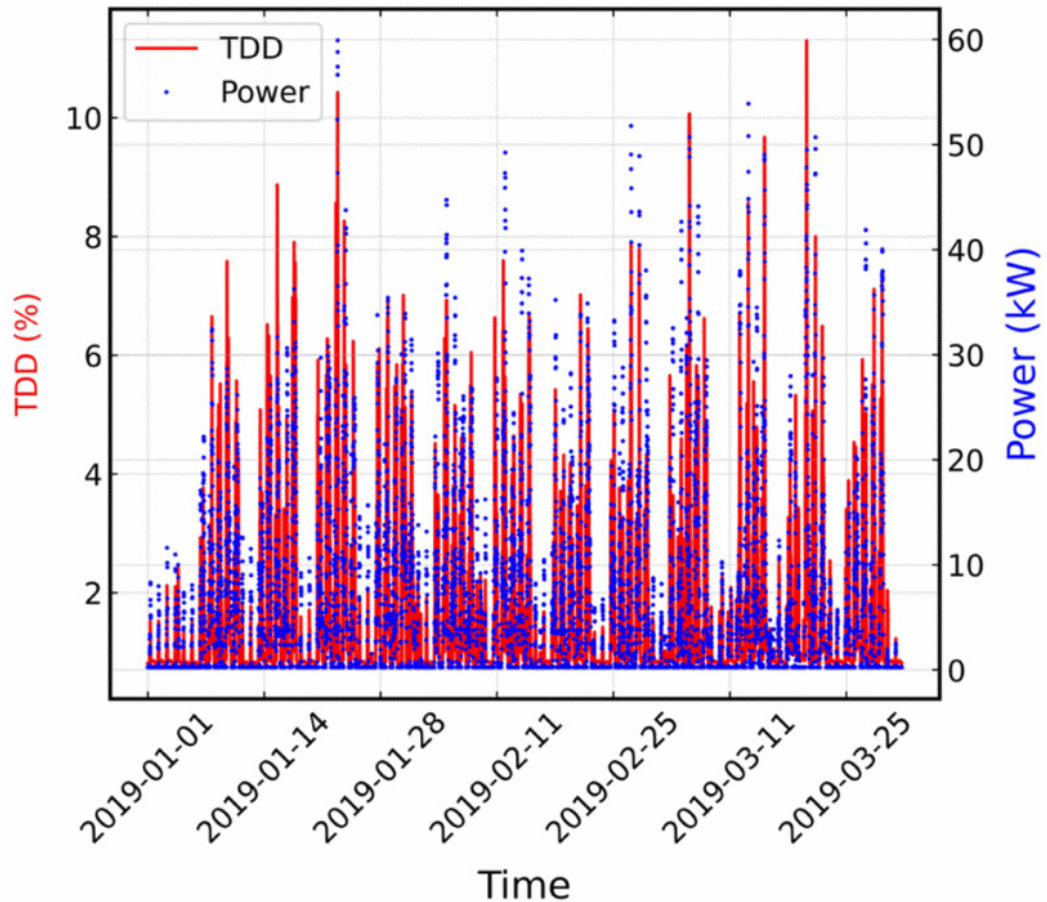
Season	no EVs		Opt. EV load		Unopt. EV load	
	summer	winter	summer	winter	summer	winter
Max. % trafo load	46.22	47.20	52.36	53.66	62.59	63.92
Min. % trafo load	32.81	31.12	32.81	35.30	31.12	31.12
Peak power [MW]	18.48	18.88	20.94	21.46	25.03	25.56
Average power [MW]	16.40	16.05	17.55	17.20	17.55	17.21
PAR (power)	1.13	1.18	1.19	1.25	1.43	1.48
Max. voltage deviation [%]	0.50	0.58	0.72	0.82	1.09	1.20

Suurteholatauksen aiheuttamat tehopiikit vaikuttavat myös sähköverkon vakauteen ja sähkönlaatuun. Latauksen aikana tapahtuva nopea kuormituksen nousu voi aiheuttaa harmoni-

sia ja supraharmonisia häiriöitä sekä virran ja jännitteen vaihtelua. Nämä häiriöt johtuvat suurteholatauksen tekniikasta ja komponenteista, jotka voivat syöttää verkkoon epäsäännöllisiä taajuuksia ja yliaaltoja. Erityisesti sähköverkon ollessa heikko nämä haasteet korostuvat, koska verkko ei pysty vaimentamaan kuormituksen muutoksia tehokkaasti. Tällaisissa tilanteissa on hyvin tärkeää pienentää kuormia optimoimalla latauksia tai käyttämällä energiavarastoja, kuten puskuriakkuja. (Wang et al., 2021.)

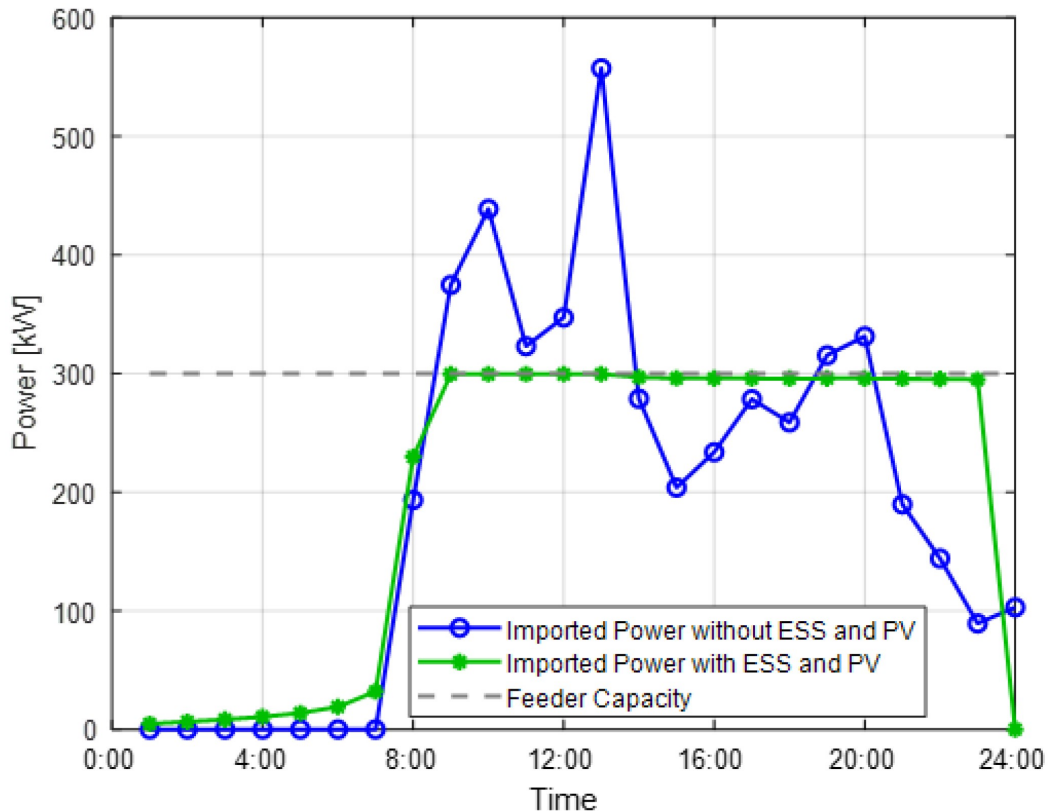
Supraharmoniset aallot (2-150 kHz) ovat erityisen haasteellisia suurteholatauksen sivutuotteita, jotka syntyvät inverttereistä eli tasasuuntaajista. Tavallisesti sähköjärjestelmissä käytetään alle 2 kHz aaltoja harmooniseen analyysiin, mutta sähköajoneuvojen latauksessa käytetään huomattavasti korkeampia taajuuksia. Latureiden inverttereissä käytetään kytkentätaajuutena supraharmonisia aaltoja, sillä ne mahdollistavat järjestelmälle korkean hyötysuhteen, kustannustehokkuuden ja kevyen koon. Supraharmoniset aallot voivat kuitenkin vuotaessaan pienjänniteverkkoon aiheuttaa haitallisia vaikutuksia verkkoon ja laitteisiin. Tämän vuoksi suurteholatureiden suunnittelussa on tärkeää ottaa huomioon supraharmonisten aaltojen vuotamisen hallitseminen soveltuvilla suodattimilla. (Wang et al., 2021.)

Supraharmonisten aaltojen määrään vaikuttaa osittain lataustehon suuruus. Kuvassa 7 näkyy virran kokonaiskuormavääritymä (TDD), joka on vähäistä alhaisilla lataustehoilla, mutta noin puolissa lataustapahtumissa TDD nousee huomattavasti korkeilla lataustehoilla. Lisäksi samassa tutkimuksessa mainitaan kolmannen harmonisen aallon moninkertaistuvan, kun latausteho nousee 50-100 % nimellistehosta. Eli suurteholatauksessa ja latauksen ollessa lähellä nimellistehoa harmonisilta häiriöiltä ei voi välttyä. Puskuriakku pystyy tasaamaan latausprofiilia ja epäsuorasti vähentämään häiriöiden vaikutusta sähköverkkoon, sillä häiriöt ovat merkittävämpiä päätyessään heikkoon verkkoon. Kuitenkin pelkkä verkon kuormituksen vähentäminen ei riitä harmonisten häiriöiden pienentämiseen, mikäli laturin toimintateho on korkea. Lopulta harmonisten häiriöiden määrä ja laatu riippuu laturin tekniikasta ja suodattimista. (Miraftabzadeh et al., 2023.)



Kuva 7: Virran kokonaiskuormavääritymä (TDD) verrattuna kokonaisaktiiviseen tehonkulutukseen kesällä 2019 (Miraftabzadeh et al., 2023)

Energiavarastojen vaikutusta sähköajoneuvojen latausaseman tehokuormaan havainnollistaa erinomaisesti kuva 8. Kyseinen kuva on USA:n simulaatiohankkeesta, jossa toteutettiin latausasema energiavarastolla, aurinkopaneelijärjestelmällä ja neljällä 300 kW suurteholaturilla. Ilman puskuriakkua ja aurinkopaneeleita järjestelmän huipputeho nousisi melkein 600 kilowattiin, mutta niiden avulla teho ei nouse 300 kilowatin yli. Puskuriakulla voidaan siis rajoittaa latausaseman kuorma haluttuun tasoon, jolloin vältetään ylikuormituksilta ja mahdollistetaan latausaseman käyttö rajoitetun sähköverkon alueella. Akku varaa energiaa hiljaisina aikoina sähköverkosta tai aurinkopaneeleista ja syöttää sen latausjärjestelmään kuormituspiikkien aikana.



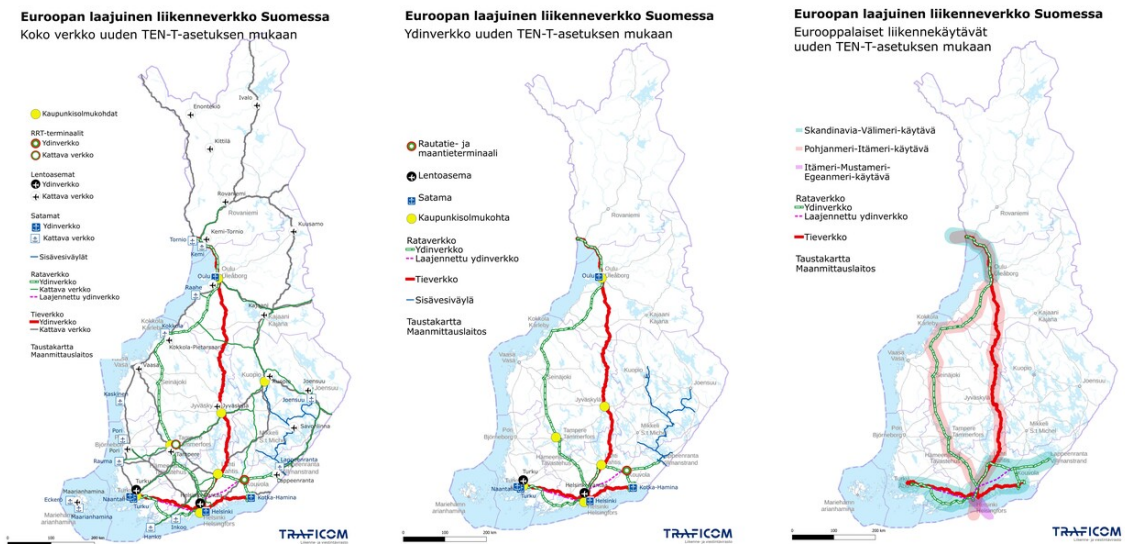
Kuva 8: ESS:n ja aurinkopaneelien vaikutus verkosta otettuun tehoon verrattuna pelkkään verkko-ottoon (Heath, Wolbertus & Heller, 2024)

## 4.2 TEN-T-järjestelmä

TEN-T (Trans European Transport Network) on Euroopan laajuinen liikenneverkosto, joka mahdollistaa tavaroiden ja henkilöiden saumattoman liikkumisen Euroopan unionissa. Lisäksi verkosto koostuu kolmesta eri tasosta: ensimmäisessä vaiheessa toteutetaan vuoteen 2030 mennessä ydinverkko, toisessa vaiheessa laajennettu ydinverkko vuoteen 2040 mennessä, ja kolmannessa vaiheessa valmistuu koko kattava verkko vuoteen 2050 mennessä. Liikenneverkosto koostuu kaikista liikennemuodoista, kuten meri-, maantie- ja rautatieliikenteestä, mutta tässä työssä ja kappaleessa keskitytään Suomeen rakennettavaan maantieverkoston. Maantieverkostolle on asetettu tietyt vaatimukset sähköisen liikenteen latausasemien sijoittamiselle ja teholle, joihin puskuriakut voivat tarjota potentiaalisen ratkaisun. Raskaan liikenteen latausasemat ovat erityisen kiinnostavia niiden huomattavien suurten teho- ja kapasiteettivaatimusten vuoksi. (Traficom, 2024.)

TEN-T-verkostolle on tarkat määräykset latausasemien sijoituksille ja kapasiteeteille. Asetuksen (EU) 2023/1804 mukaan ydintieverkon raskaalle liikenteelle on oltava vuoteen 2030 mennessä 60 kilometrin välein latausasemia, jotka tarjoavat vähintään 3600 kilowatin anto-

tehon ja vähintään kaksi latauspistettä, joista vähintään kahden latauspisteen on tuettava 350 kilowatin lataustehoa. Lisäksi kattavan tieverkon osalta latausasemia täytyy sijoittaa enintään 100 kilometrin välein, joiden antoteho on vähintään 1500 kilowattia ja sisältää vähintään yhden 350 kilowatin latauspisteen. Verkon laajuutta Suomessa osoittaa kuva 9, josta ydinverkkoon sisältyy 1050 kilometriä teitä ja kattavaan ydinverkkoon sisältyy 5090 kilometriä teitä.



Kuva 9: TEN-T verkko Suomessa (Traficom, 2024)

Puskuriakkujen käyttö TEN-T-verkoston latausasemilla voi olla keskeisessä roolissa asetettujen teho- ja sijaintivaatimusten täyttämiseksi. Erityisesti heikon sähköverkon alueilla latausasemien rakentaminen voi olla haastavaa ilman energiavarausta tai mittavia sähköverkon vahvistuksia. Aiemmin työssä tarkastellut kapasiteettikartat osoittavat, että sähköverkon kapasiteetti vaihtelee Suomessa huomattavasti maantieteellisesti. Vaikka Suomen kantaverkko on teknisesti luotettava ja valtakunnallisesti sähkön säätökapasiteettia on runsaasti, alueelliset jakeluverkot — erityisesti haja-asutusalueilla — eivät usein kykene tarjoamaan megawattiluokan tehoa ilman laajamittaisia verkkojen rakennustöitä. Varsinkin TEN-T-verkoston laajennettu ydinverkko kulkee tällaisilla alueilla. Lisäksi sähköverkon päivittäminen ei välttämättä ole järkevää latauskuormien vuoksi, sillä latauskuormitukset ovat hyvin jaksottaisia. Kuormitus on ruuhkatuntien aikana hyvin suurta, mutta päivitetty kapasiteetti jäisi vajaakäytölle suurimman osan ajasta.

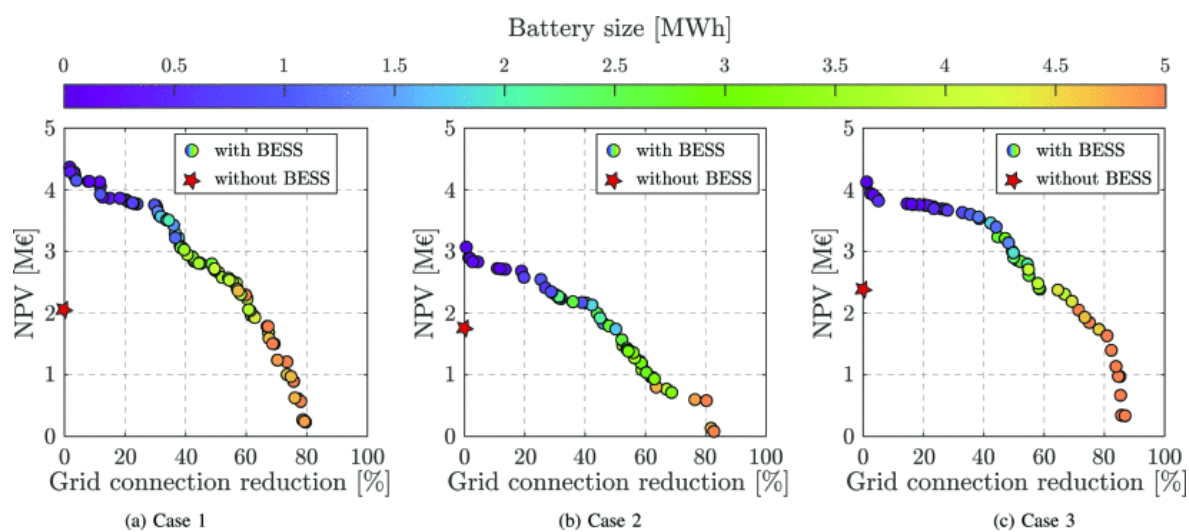
### 4.3 Puskuriakun taloudellinen kannattavuus

Puskuriakkujen käyttö sähköajoneuvojen latausjärjestelmässä ei pelkästään tue kuormituksen hallintaa, vaan voi myös parantaa järjestelmän taloudellista kannattavuutta. Akustolla voidaan tasoittaa huipputehontarvetta, vähentää sähköhankintakustannuksia ja hyödyntää

sähkön hintavaihteluita energiamarkkinoilla. Lisäksi akkuenergiavarasto mahdollistaa osallistumisen taajuudensäätömarkkinoille (esim. FCR), mikä muodostaa esimerkiksi Saksassa akkuenergiavarastojen keskeisen käyttötarkoituksen. Nämä edellä mainitut tulovirrat voivat merkittävästi parantaa puskuriakkujärjestelmän taloudellista kannattavuutta etenkin, jos latausaseman käyttöaste jää alhaiseksi varsinaisen ajoneuvolatauksen kannalta.

Useat tutkimukset ovat kuitenkin osoittaneet, että BESS-järjestelmät eivät ole yksinään taloudellisesti kannattavia useimmissa käyttötapauksissa. Esimerkiksi Hu, Armada & Jesús Sánchez 2022 arvioivat, että sähköenergian arbitraasi - eli sähkön ostaminen ja myyminen hintavaihteluita hyödyntäen - ei ole taloudellisesti kannattavaa akkuvarastoilla useimmilla Euroopan sähkömarkkinoilla. Sähkön hinnan vaihtelut eivät siis ole tarpeeksi kattamaan akuston hankinta- ja kulumiskustannuksia, mutta taajuudensäätömarkkinoille osallistuessa akkujärjestelmän kannattavuus parantuu. Näissä arvioissa ei kuitenkaan tutkittu puskuriakun taloudellista hyötyä yhdistettynä sähköajoneuvojen lataukseen, joka voi olla merkittävä tulonlähde.

Stecca et al. 2022 tutkivat BESS-järjestelmän yhdistämistä pikalataukseen ja analysoivat, miten akuston koko ja sähköverkon liittymäkoko vaikuttavat järjestelmän nettonykyarvoon. Tutkimuksessa oli mukana kolme eri tilannetta, joissa sähköverkon kapasiteetti ja aurinkopaneelijärjestelmän teho vaihtelivat. Verkon kapasiteetit olivat 2.3 MW, 27.5 MW ja 1.8 MW ja paneelien tehot olivat 0.5 MWp, 27.5 MWp ja 1.8 MWp. Kuvasta 10 nähdään, että pienet ja keskisuuret akustot (0.5-1.5 MWh) voivat merkittävästi parantaa järjestelmän taloudellista kannattavuutta ja kuvan avulla voidaan arvioida eri kokoisten akkujen soveltuvuutta suurteholataukseen. Eli tutkimuksessa osoitettiin, että pienen puskuriakun käyttö voi olla kannattavaa ilman sähköverkon rajoitteita ja näin ollen esimerkiksi olemassa olevaan latausasemaan voi olla kannattavaa asentaa puskuriakku.



Kuva 10: BESS-järjestelmän nettonykyarvo (NPV) arvo suhteessa sähköverkon liittymäköön pienentämiseen eri akkukoilla (Stecca et al., 2022)

Kuvan 10 mukaan suuret (yli 4 MWh ja yli 60% verkkoliittymän pienentäminen) akustot eivät olisi taloudellisesti kannattavia, mikä on ristiriidassa monen pilottihankkeen kanssa. Tämä voi johtua siitä, että mahdollisia lisähyötyjä sähköverkon vahvistustarpeen vähentämisestä ja liittymämaksun alenemisestä ei otettu Stecca et al. 2022 tutkimuksessa mukaan, vaan tutkittiin puskuriakun lisäämistä olemassa olevaan latausasemaan. Kuten aiemmin työssä on todettu, puskuriakun sijoittaminen voi tuoda yli 60 % säästöt verrattuna jakeluverkon päivittämiseen. Näin ollen puskuriakun käyttö rajoitetun verkon alueella voi olla taloudellisesti kannattavaa, jos kyseessä on uuden suurteholatausaseman rakentaminen ja vältytään sähköverkon päivittämiseltä. Lisäksi tällaisissa tilanteissa puskuriakku on suurteholatauksen mahdollistaja, eikä pelkästään taloudellinen lisä.

Yhteenvedon voidaan todeta, että BESS-järjestelmät voivat tuoda monenlaisia taloudellisia hyötyjä suurteholataukseen, mutta puskuriakku täytyy mitoittaa oikein hyötyjen maksimoimiseksi. Latausasemaan, jossa ei ole sähköverkon rajoitetta, on taloudellisesti kannattavinta asentaa pieni (10-40 % verkkoliittymään pienentäminen) puskuriakku. Puskuriakulla on kuitenkin mahdollista korvata jopa 80 % sähköverkon syötöstä, jolloin säästöt muodostuvat jakeluverkon päivittämisen vähentämisestä. Kun yhdistetään akkuteknologioiden kehittyminen, laskevat investointikustannukset sekä latausverkoston laajentuva kysyntä, voidaan puskuriakkujärjestelmien olevan yhä keskeisemmässä osassa latausinfrastruktuuria.

## 5 Suurteholatausaseman toteutus puskuriakulla

Tässä kappaleessa esitetään simuloitu toteutus sähköajoneuvojen suurteholatausasemasta, jossa käytetään puskuriakkujärjestelmää sähköverkon kuormituksen tasaamiseksi. Tarkoituksena on arvioida latausaseman energiankulutus ja käyttöaste todellisen käyttödatan perusteella, ja miten puskuriakun mitoitus voidaan suorittaa tämän tiedon pohjalta. Analyysin tavoitteena on selvittää, minkä suuruinen akku voisi olla teknisesti perusteltu, sekä miten se vaikuttaisi sähköverkon liittymäkoon tarpeeseen.

### 5.1 Latausdatan sisältö

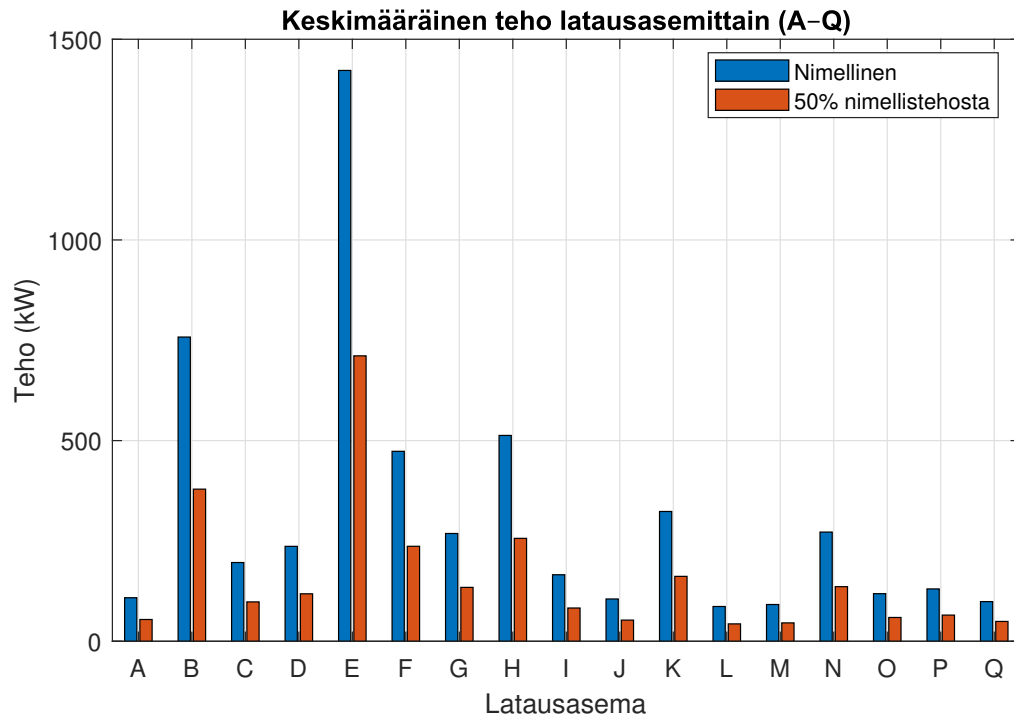
Tarkasteltava latausdata koostuu sähköajoneuvojen käytettävyystiedoista, jotka on kerätty 17 latausasemalta eri puolilta Suomea, keskittyen pääväylien varrelle. Data on saatu käyttämällä TomTomin EV Charging Stations Availability APIa (BV, 2024), joka tarjoaa tietoa latauspisteiden tilasta. Aineiston aikaväli on 21.2.2025-10.3.2025, ja dataa on kerätty 10 minuutin aikavälillä otettujen tilannekuvien muodossa. Jokainen havainto kuvaa hetkellistä tilannetta asemalla (A-Q), mukaan lukien eri latauspisteiden lukumäärä, käytettävyytila (kokonaisuusmäärä, saatavilla, varattu, huollossa), sekä tekniset ominaisuudet kuten laturin nimellisteho (kW) ja liittintyyppi.

Data ei kuitenkaan sisällä yksittäisiä lataustapahtumia, vaan perustuu hetkelliseen tilannekuvaan. Näin ollen esimerkiksi alle 10 minuutin lataustapahtumat voivat jäädä huomioimatta, jos ne tapahtuvat keräyksen välisenä aikana. Tämä voi johtaa pieneen aliarvioon käyttöasteessa erityisesti ruuhkaisilla latausasemilla, joten tuloksia voidaan pitää suuntaa antavina. Lisäksi todellinen latausteho täytyy arvioida, sillä aineisto sisältää pelkästään laturin nimellistehon ja niiden määrän. Tästä huolimatta aineisto antaa luotettavan pohjan latausasemien käytettävyydestä ja kuormitusprofiilista, jota voidaan pitää perustana puskuriakkujärjestelmän mitoitukseen.

### 5.2 Puskuriakun mitoitus

Latausasemien käytettävyyttä osoittaa kuva 11, jossa on laskettu asemille keskimääräiset tehot latauspisteiden käytön mukaan. Pelkästään nimellisteholla laskettuna keskimääräiset kuormat ovat todella suuria, esimerkiksi E-latausasemassa keskimääräinen teho on melkein 1500 kilowattia. Näin ollen 50 % nimellistehosta antaa paremman kuvan todellisesta latauskuormasta. Koska työn laajuus ei mahdollista puskuriakun mitoitusta jokaiselle latausasemalle, tarkastelu rajataan asemien B ja E mitoitukseen. Näillä asemilla on suurimmat kuormat aineistosta, jolloin puskuriakun käyttö voi näissä tapauksissa olla perusteltua. Yksi puskuriakun käyttötarkoituksista on suurien kuormitushuippujen tasaaminen, joita näissä

latausasemissa esiintyy.

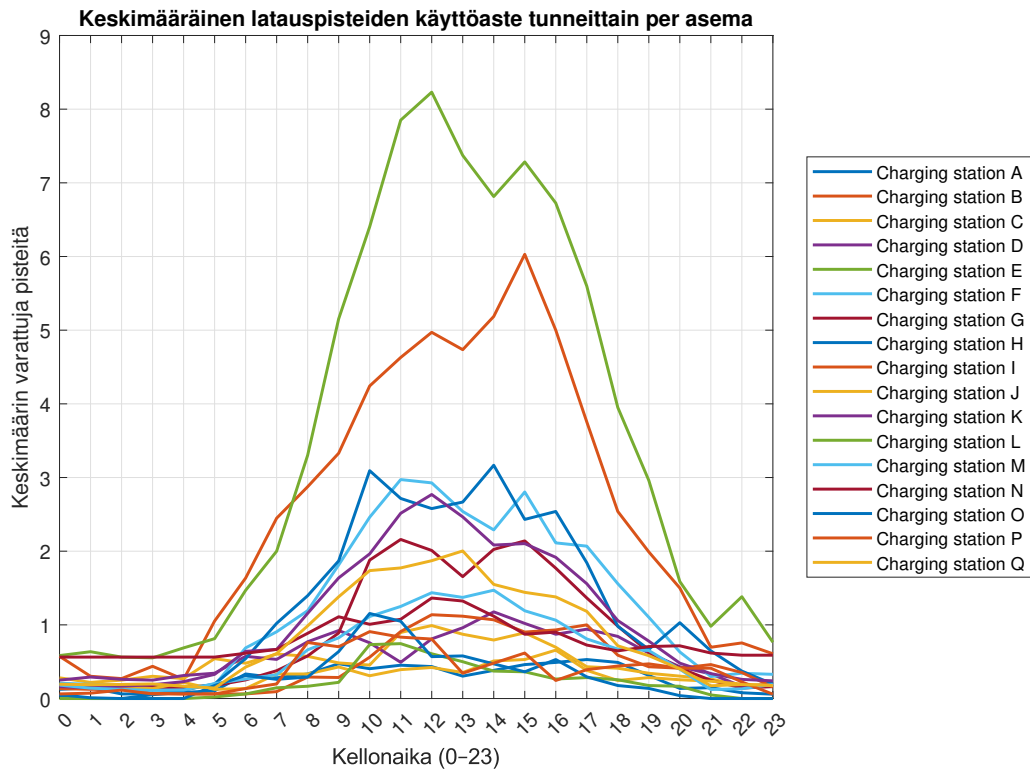


Kuva 11: Latausasemien A-Q keskimääräiset tehot latauspisteiden käytön mukaan

Kuvassa 12 on esitelty kaikkien latausasemien keskimääräinen käyttöaste tunneittain vuorokauden ajalta. Kuvasta huomataan, että kaikkien latausasemien käyttö painottuu 9-17 välille ja erityisesti asemat E ja B ovat 2-3 suuremmalla käytöllä kuin muut asemat. Näin ollen nämä latausasemat soveltuvat puskuriakkujen käyttöön, sillä akuilla voidaan tasata päivän kuormitushuiput ja ladata ne takaisin täyteen hiljaisempina aikoina. Asemien keskeisimmät ominaisuudet on kuvattu taulukossa 5, joiden avulla akku mitoitetaan.

Taulukko 5: Asemien B ja E latauspisteiden jakauma ja keskimääräinen käyttö

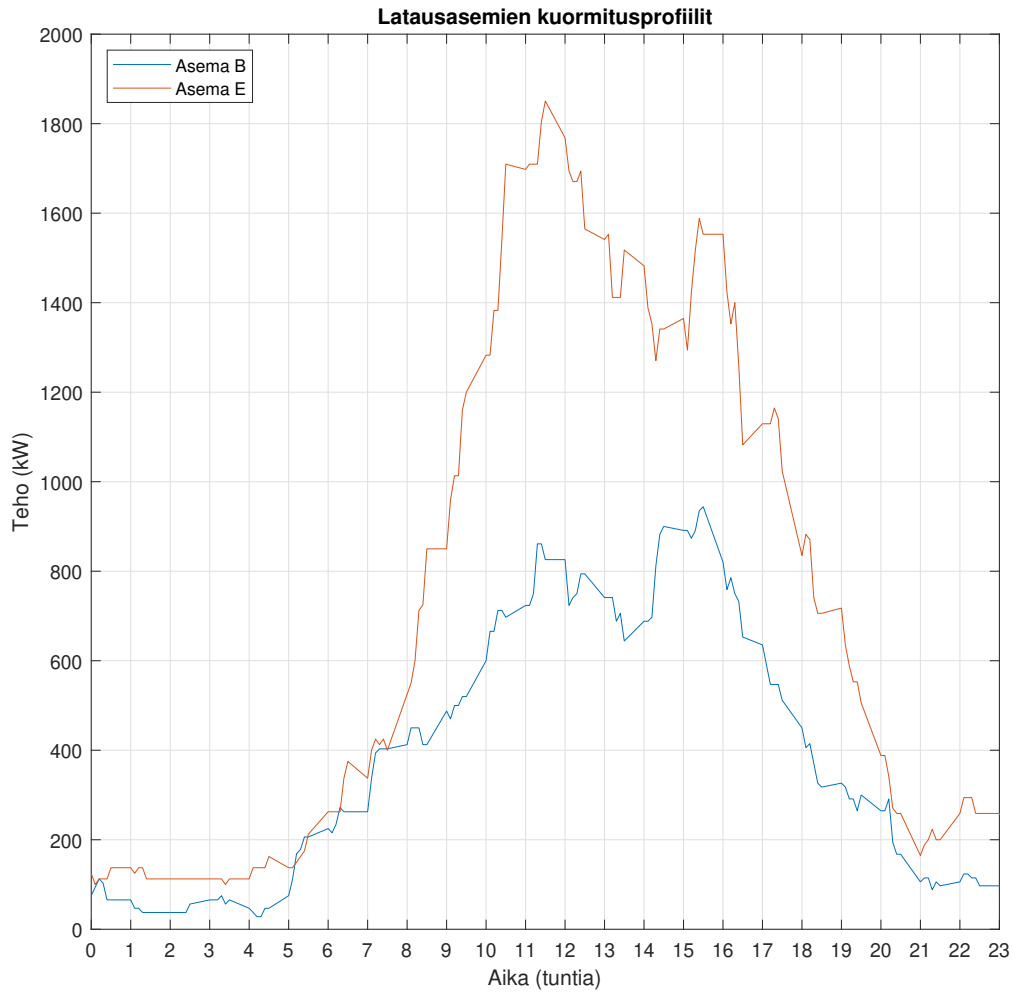
Ominaisuus	Asema B	Asema E
Suurteholataus (CCS)	12 × 300 kW 2 × 200 kW	26 × 400 kW
Hitaampi lataus (Type2)	–	2 × 22 kW
Keskimäärin käytössä (suurteho)	2,54 × 300 kW 0,31 × 200 kW	3,59 × 400 kW
Keskimäärin käytössä (hidas)	–	0,85 × 22 kW
Huipputeho (teoreettinen)	~4,0 MW	~10,4 MW



Kuva 12: Latausasemien A-Q käyttöaste tunneittain

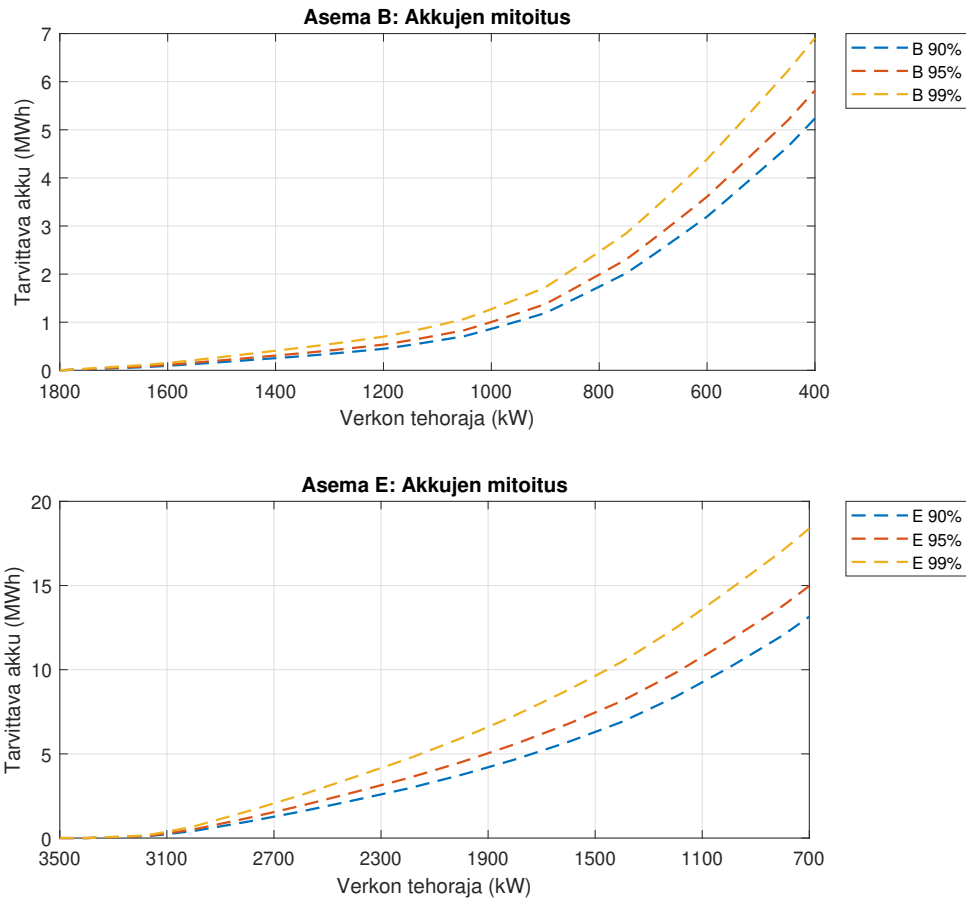
Kuva 13 osoittaa latausasemien B ja E kuormitukset vuorokauden ajalta. Esitetyt kuormitusprofiilit on laskettu simuloimalla latauspisteiden käyttöä, sillä todelliset latausnopeudet eivät olleet saatavilla. Tämä esitystapa ottaa huomioon, ettei latauspisteitä käytetä jatkuvasti niiden nimellisteholla, vaan keskimääräinen teho on tyypillisesti alempi. Korjauskertoimet perustuvat aiempaan kirjallisuuteen ja pilottihankkeisiin eri teholuokissa, esimerkiksi Wu et al. 2023 hankkeen mukaan sähköajoneuvot latasivat 300 kilowatin laturilla keskimäärin 150 kilowatin teholla. Tällöin keskiarvollisesti koko datasta laskettuna E-aseman huipputehoksi tulee 1851 kW ja B-aseman 944 kW, mutta näiden tehopiikkien ulkopuolella asemien kuormitus on vähäistä.

Latausasemien päivittäisen energiantarpeen keskihajonta on kuitenkin todella suurta, 5.3 MWh asemalle E ja 1.8 MWh asemalle B. Tällöin mitoittamiseen ei voida käyttää koko aineiston päivittäisen energiantarpeen keskiarvoa, sillä se ei takaa haluttua luotettavuutta äärikuormitus-tilanteissa. Esimerkiksi aseman E päivittäinen energiantarve sijoittuu pääosin välille 15-30 MWh, mutta voi ylittää 35 MWh ruuhkaisina päivinä. Aseman B vaihteluväli on tyypillisesti 5-15 MWh. Näin ollen mitoittamiseen täytyy ottaa huomioon energiantarpeen tilastollinen jakauma, jotta puskuriakusto pystyy kattamaan myös kuormittavat käyttöpäivät.



Kuva 13: Latausasemien B ja E kuormitusprofiilit

Puskuriakun mitoitus perustuu koko aineistosta lasketun latausprofiilin ja sähköverkon tehorajan erotukseen. Tästä saadaan puskuriakun korvaava energiamäärä jokaiselle päivälle, eli kuinka paljon tehorajan ylittävää kulutusta on korvattava akulla. Päivittäisistä energiantarpeista lasketaan keskiarvo ja -hajonta, joiden avulla voidaan määrittää tarvittava puskuriakun kapasiteetti valitulla luotettavuustasolla. Luotettavuustasot kuvaavat sitä osuutta päivistä, jolloin puskuriakun kapasiteetti riittää kattamaan tehorajan ylittävän osuuden. Esimerkiksi 99 % luottamustaso riittää kattamaan melkein kaikki lataustapahtumat valitulla verkon rajoituksella, mutta edellyttää suurempaa kapasiteettia kuin 90 % ja 95 % luottamustasot. Tämä lähestymistapa mahdollistaa mitoituksen toteuttamisen eri käyttötilanteissa, eli sen mukaan, onko puskuriakun tarkoitus toteuttaa suurteholataus lähes kaikissa tilanteissa vai ainoastaan tyypillisinä käyttöpäivinä.



Kuva 14: Puskuriakun mitoitus eri verkon tehorojoilla ja luottamustasoilla asemille B ja E

Kuva 14 osoittaa valittujen latausasemien puskuriakun mitoituksen riippuen sähköverkon syötöstä ja luottamustasosta. Luottamustasot ovat edellä mainitut 90 %, 95 % ja 99 % ja sähköverkon syötöt molemmille asemille ovat rajattu huipputehon ja keskimääräisen tehon kulutuksen mukaan. Aseman B keskimääräinen tehon kulutus on 400 kW ja asemalle E 700 kW. Puskuriakkua ei voida käyttää sähköverkon syötön ollessa alle keskimääräisen tehon, koska silloin puskuriakkua käytetään enemmän, mitä se ehtii latautua. Sähköverkon syötön ylärajaksi on valittu kunkin aseman huipputeho, koska sitä suuremmilla syöttötehoilla puskuriakku ei ole enään tarpeellinen — kaikki tarvittava teho saadaan jo suoraan verkosta.

Molempien asemien kohdalla havaitaan selkeä suhde sähköverkon syötön ja puskuriakun koon välillä. Verkon syötön pienentyessä puskuriakun on korvattava suurempi osa kulutuksesta, jolloin sen koko kasvaa. Erityisesti 99 % luottamustasolla akuston koko kasvaa jyrkemmin sähköverkon syötön ollessa lähellä alarajaa. Tämä johtuu siitä, että sähköverkon syötön ollessa lähellä huipputehoa puskuriakun tarvitsee pelkästään tasata kuormitushuiput. Mutta syötön pienentyessä kohti keskimääräistä tehonkulutusta, akun täytyy korvata yhä enem-

män kuormitusta johtuen asemien latausprofileista. Esimerkiksi aseman E puskuriakun koko kasvaa 7 MWh:sta yli 18 MWh:iin, kun tehoraja lasketaan 1800 kW:sta 700 kW:iin. Lisäksi taulukosta 6 nähdään, että asema E tarvitsee yli kolme kertaa suuremman puskuriakun kuin asema B kaikilla luottamustasoilla. Tämä selittyy aseman E 48 % korkeammalla keskimääräisellä tehonkulutuksella ja 67 % laajemmalla kuormituksen hajonnalla.

Taulukko 6: Puskuriakun kapasiteetti (MWh) eri luottamustasoilla valituilla verkkorajoilla.

Asema	Verkon raja (kW)	90 %	95 %	99 %
B	600	3.20 MWh	3.61 MWh	4.39 MWh
E	1000	10.13 MWh	11.73 MWh	14.74 MWh

Luottamustasolla on myös merkittävä vaikutus puskuriakun mitoitukseen. Korkeampi luottamustaso edellyttää aina suurempaa akustoa. Esimerkiksi latausaseman B sähköverkon syötön ollessa 600 kW, puskuriakun koko suurenee 27 %, kun luottamustaso nostetaan 90 prosentista 99 prosenttiin. Kuten mitoituksen esittelyssä mainittiin, luottamustasolla voidaan vaikuttaa puskuriakun käyttötarkoitukseen. 99 % luottamustasolla mahdollistetaan latausaseman toiminta lähes kaikissa käyttötilanteissa. Tämän luottamustason käyttäminen soveltuu latausasemille, joissa latauksen häiriöttömyys on tärkeää, esimerkiksi ruuhkaisille asemille tai raskaan liikenteen latauspisteille. Matalamman luottamustason puskuriakut, kuten 90 % ja 95 % soveltuvat latausasemille, joiden käyttö on vähäisempää tai ennustettavampaa.

Yhteenvetona voidaan todeta, että puskuriakun mitoitus riippuu todella paljon sekä sähköverkon syötöstä että valitusta luottamustasosta. Kuitenkin eniten akuston kokoon vaikuttavat latausaseman ominaisuudet, eli sähköajoneuvojen latureiden määrä ja suuruus sekä aseman käyttöaste. Latausasemassa E on jopa 26 suurteholaturia ja käytössä keskimäärin 3.6, kun taas asemassa B niitä on 14 ja käytössä keskimäärin 2.5. Analyysin tavoitteena oli tutkia puskuriakun kokoa ja miten se vaikuttaa sähköverkon liittymäkokoan. Tähän tavoitteeseen päästiin, sillä puskuriakut saatiin mitoitetua molemmille sähköajoneuvojen latausasemille eri sähköverkon syötöillä.

## 6 Johtopäätökset

Tämän kandidaatin työn tarkoituksena oli tutkia puskuriakkujärjestelmien käyttöä suuritehoisissa sähköajoneuvojen latausjärjestelmissä. Aihetta tutkittiin ensin selvittämällä suurteholatauksen ja puskuriakkujen teknologioita ja nykytilannetta. Lisäksi tarkasteltiin suurteholatauksen aiheuttamia haasteita sähköverkolle ja kuinka puskuriakku voi ehkäistä niitä. Lopuksi suoritettiin puskuriakun mitoitus kahdelle Suomessa sijaitsevalle sähköajoneuvojen latausasemalle.

Kirjallisuuskatsauksen perusteella litiumioniakut ovat tällä hetkellä sopivin akkuteknologia energianvarastointiin suurteholatausta varten. Tätä tukee käytännön havainto, sillä arviolta 80-90 % kaikista Saksassa vuosien 2012 ja 2019 käytössä olleista suurista akkujärjestelmistä olivat litiumioniakkuihin pohjautuvia. Lisäksi sähköajoneuvojen latausasemissa käytettiin akkujen tukena aurinkopaneeleita, jotka lisäävät järjestelmän omavaraisuutta ja ympäristöystävällisyyttä. Pilottihankkeiden perusteella aurinkopaneelien käyttö ei ole kuitenkaan yksiselitteistä puskuriakkujärjestelmissä, vaan niiden kannattavuus pitää laskea tapauskohtaisesti.

Työn perusteella voidaan todeta, että puskuriakut tarjoavat tehokkaan ratkaisun lisääntyvään sähköajoneuvojen lataustarpeeseen. Sähköajoneuvot ja niiden tarvitsema latauskapasiteetti tulevat tutkimusten mukaan kasvamaan lähitulevaisuudessa, jolloin niiden haasteet myös tulevat suuremmin esiin. Yksi näistä haasteista on suurteholatausasemien huipputehontarve, joka voi ylittää paikallisesti jakeluverkon kapasiteetin. Työssä havaittiin, että puskuriakun sijoittaminen latausasemalle voi olla kustannustehokkaampi ratkaisu kuin sähköverkon päivittäminen, erityisesti alueilla, joilla verkon kapasiteetti on rajallinen. Puskuriakku voi siis mahdollistaa suurteholatauksen alueilla, joissa sähköverkon kapasiteetti ei riitä siihen.

Verkkovuorovaikutuksen osalta havaittiin, että puskuriakut voivat alentaa huipputehoa, vähentää jännivaihtelua ja mahdollistaa suurteholatauksen rajoitetun sähköverkon alueella. Lisäksi huomattiin, että puskuriakut voivat epäsuorasti vähentää suurteholatauksen aiheuttamia supraharmonisten häiriöiden vaikutuksia sähköverkkoon. Puskuriakuilla on myös mahdollista myydä sähköä verkkoon ja osallistua reservimarkkinoille, mikä entisestään parantaa latausjärjestelmien kustannustehokkuutta.

Tässä tutkielmassa suoritettiin puskuriakun mitoitus kahdelle latausasemalle, mutta ei tarkemmin tutkittu puskuriakkujen sijoittamista sijainnin kannalta. Yksi jatkotutkimuskohde voisi olla sähköverkon kapasiteettikarttojen ja suuritehoisten sähköajoneuvojen latausasemien yhdistäminen. Tutkimuksessa voitaisiin havainnoida potentiaalisia kohteita puskuriakun sijoittamiselle huomioiden lataustarpeen ja sähköverkon kapasiteetin.

## Lähdeluettelo

- Argiolas, L., Stecca, M., Ramirez-Elizondo, L. M., Soeiro, T. B. & Bauer, P. (2022). Optimal Battery Energy Storage Dispatch in Energy and Frequency Regulation Markets While Peak Shaving an EV Fast Charging Station. *IEEE Open Access Journal of Power and Energy* 9, s. 374–385. DOI: 10.1109/OAJPE.2022.3198553.
- Bowen, A., Engelhardt, J., Gabderakhmanova, T., Marinelli, M. & Rohde, G. (2022). Battery Buffered EV Fast Chargers on Bornholm: Charging Patterns and Grid Integration. Teoksessa: *2022 57th International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, s. 1–6. DOI: 10.1109/UPEC55022.2022.9917690.
- BV, T. I. (2024). *EV Charging Stations Availability*. [Verkkosivu]. [Viitattu: 2025-04-02]. URL: <https://developer.tomtom.com/ev-charging-stations-availability-api/documentation/ev-charging-stations-availability-api/ev-charging-stations-availability>.
- Caruna (2024). *Carunan kapasiteettikartta*. [Verkkosivu]. [Viitattu: 2025-02-24]. URL: <https://plus.caruna.fi/capacities-map>.
- Cui, X., Ramyar, A., Siegel, J. B., Mohtat, P., Stefanopoulou, A. G. & Avestruz, A.-T. (2022). Comparing power processing system approaches in second-use battery energy buffering for electric vehicle charging. *Journal of Energy Storage* 49. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104017>.
- Drews-Walkling, P., Kerksen, C. & Tiedemann, R. (2021). Power 400 - High Power Charging System with Battery Buffer. Teoksessa: *ETG Congress 2021*, s. 1–4. ISBN: 978-3-8007-5549-3.
- Euroopan unioni (2023). *Euroopan parlamentin ja neuvoston asetus (EU) 2023/1804*. [Verkkosivu]. [Viitattu: 2025-04-20]. URL: [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/PDF/?uri=OJ%3AL\\_202401679](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/PDF/?uri=OJ%3AL_202401679).
- Figgenger, J., Stenzel, P., Kairies, K.-P., Linßen, J., Haberschusz, D., Wessels, O., Robinius, M., Stolten, D. & Sauer, D. U. (2021). The development of stationary battery storage systems in Germany—status 2020. *Journal of Energy Storage* 33. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101982>.
- Gerold, E., Lerchhammer, R., Strnad, C. & Antrekowitsch, H. (2023). Towards a sustainable approach using mineral or carboxylic acid to recover lithium from lithium iron phosphate batteries. *Hydrometallurgy* 222, s. 105187. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2023.106187>.
- Gilleran, M., Bonnema, E., Woods, J., Mishra, P., Doebber, I., Hunter, C., Mitchell, M. & Mann, M. (2021). Impact of electric vehicle charging on the power demand of retail buildings. *Advances in Applied Energy*. DOI: 10.1016/j.adapen.2021.100062.

- Heath, E., Wolbertus, R. & Heller, R. (2024). Optimal Sizing of a Battery-Supported Electric Vehicle Charging Hub with a Limited-Capacity Grid Connection. *World Electric Vehicle Journal* 15(4). DOI: 10.3390/wevj15040133.
- Hu, Y., Armada, M. & Jesús Sánchez, M. (2022). Potential utilization of battery energy storage systems (BESS) in the major European electricity markets. *Applied Energy* 322, s. 119512. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119512>.
- International Energy Agency (2024). *Global EV Outlook 2024*. [Viitattu: 2025-02-24]. Paris: International Energy Agency. URL: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2024>.
- Miraftabzadeh, S. M., Pejovski, D., Longo, M., Brenna, M. & Pasetti, M. (2023). Impact of Electric Vehicle Charging on Voltage and Current Harmonics at the Point of Common Coupling. Teoksessa: *2023 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2023 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / ICPS Europe)*, s. 1–6. DOI: 10.1109/EEEIC/ICPSEurope57605.2023.10194887.
- Mogos, A. S. & Grillo, S. (2021). Impact of EV Charging Stations in Power Grids in Italy and its Mitigation Mechanisms. Teoksessa: *2021 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2021 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / ICPS Europe)*, s. 1–6. DOI: 10.1109/EEEIC/ICPSEurope51590.2021.9584782.
- Nazaralizadeh, S., Banerjee, P., Srivastava, A. K. & Famouri, P. (2024). Battery Energy Storage Systems: A Review of Energy Management Systems and Health Metrics. *Energies*. DOI: 10.3390/en17051250.
- Olabi, A., Abdelghafar, A. A., Soudan, B., Alami, A. H., Semeraro, C., Al Radi, M., Al-Murisi, M. & Abdelkareem, M. A. (2024). Artificial neural network driven prognosis and estimation of Lithium-Ion battery states: Current insights and future perspectives. *Ain Shams Engineering Journal* 15(2), s. 102429. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asej.2023.102429>.
- Olabi, A. G., Abbas, Q., Al Makky, A. & Abdelkareem, M. A. (2022). Supercapacitors as next generation energy storage devices: Properties and applications. *Energy* 248, s. 123617. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123617>.
- SESKO ry (2023). *Sähköajoneuvojen lataussuositus: Lataustavat, nimitykset ja tekniset ominaisuudet*. 6. painos, julkaistu 18.5.2023. URL: <https://www.sesko.fi>.
- Stecca, M., Vermeer, W., Soeiro, T. B., Ramirez Elizondo, L., Bauer, P. & Palensky, P. (2022). Battery Storage Integration in EV Fast Charging Station for Increasing its Revenues and Reducing the Grid Impact. Teoksessa: *2022 IEEE Transportation Electrification Conference Expo (ITEC)*, s. 109–113. DOI: 10.1109/ITEC53557.2022.9814040.
- Tercan, S. M., Elma, O., Gokalp, E. & Cali, U. (2022). An expansion planning method for extending distributed energy system lifespan with energy storage systems. *Ener-*

- gy *Exploration & Exploitation* 40(2), s. 599–618. DOI: <https://doi.org/10.1177/01445987211058304>.
- Traficom (2024). *Euroopan laajuinen liikenneverkko TEN-T*. [Verkkosivu]. [Viitattu: 2025-04-20]. URL: <https://www.traficom.fi/fi/liikenne/liikennejarjestelma/euroopan-laajuinen-liikenneverkko-ten-t>.
- Wang, L., Qin, Z., Slangen, T., Bauer, P. & Wijk, T. van (2021). Grid Impact of Electric Vehicle Fast Charging Stations: Trends, Standards, Issues and Mitigation Measures - An Overview. *IEEE*. DOI: 10.1109/OJPEL.2021.3054601.
- Wu, Z., Bhat, P. K. & Chen, B. (2023). Optimal Configuration of Extreme Fast Charging Stations Integrated with Energy Storage System and Photovoltaic Panels in Distribution Networks. *Energies* 16(5). DOI: 10.3390/en16052385.