

LAPPEENRANNAN-LAHDEN TEKNILLINEN YLIOPISTO LUT
LAPPEENRANTA-LAHTI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY LUT

LUT School of Energy Systems

LUT Scientific and Expertise Publications

Tutkimusraportit – Research Reports

131

Ville Tikka, Jani Kalenius, Otto Räisänen & Jukka Lassila

LOPPURAPORTTI: SÄHKÖAUTOJEN LATAUKSEN MUODOSTAMA KUORMITUS- JA MITOITUSTEHO ERILAISSA TOIMINTAYMPÄRISTÖISSÄ

 LUT
University



LUT-yliopisto
LUT School of Energy Systems
Tutkimusraportti 131
LUT University
LUT School of Energy Systems
Research report 131

Ville Tikka, Jani Kalenius, Otto Räisänen ja Jukka Lassila

Loppuraportti: Sähköautojen latauksen muodostama kuormitus- ja mitoitusteho erilaisissa toimintaympäristöissä

LUT-yliopisto
LUT School of Energy Systems
PL 20
35851 LAPPEENRANTA
ISBN 978-952-335-716-7
ISBN 978-952-335-716-7 (PDF)
ISSN-L 2243-3376
ISSN 2243-3376

Lappeenranta 2021

Esipuhe

Tässä raportissa esitetään tutkimusprojektin: "Sähköautojen latauksen muodostama kuormitus- ja mitoitusheho erilaisissa toimintaympäristöissä" tuloksia. Tutkimushankkeen on toteuttanut aikavälillä 11/2020–8/2021 Lappeenrannan teknillisen yliopiston (LUT) Sähkömarkkinalaboratorion tutkimusryhmä, johon kuuluivat apulaisprofessori Jukka Lassila, DI Ville Tikka, DI Otto Räisänen, DI Jani Kalenius. Tutkimushankkeen rahoittivat yhteisrahoituksella Sähkötekniikan ja energiatehokkuuden edistämiskeskus STEK ry, Sähkötutkimuspooli (ST-pooli) ja Suomen Kiinteistöliitto ry. Tämä raportti on osa hankkeen raportointia, johon kuuluvat lisäksi mittausraportti (Tikka, et al., 2021) ja hankkeen aikana tehty diplomityö (Kalenius, 2021). Ohjausryhmä kokoontui selvitystyön aikana neljä kertaa, minkä lisäksi selvitystyöhön saatiin kommentteja sähköpostitse.

Hankkeen raportissa esitetyt johtopäätökset, tulokset ja mahdolliset toimenpide-ehdotukset ovat tutkijoiden näkemyksiä, eivätkä sido selvitystyön tilaajia millään tavoin.

Lappeenranta, lokakuu 2021

Kirjoittajat

Tiivistelmä

Tämän tutkimushankkeen tavoitteena on määrittää sähköautojen lataustapahtumien aiheuttama kuormitus kiinteistöverkoissa. Liikenteen sähköistyminen on yksi keskeisimmistä ja nopeimmin kehittyvästä energiainfrastruktuuriin vaikuttavasta kehitystrendistä. Huomioiden sähköverkkojen maltillisen uusiutumistahdin, on sähköautojen nopea yleistyminen luonut tarpeen sähköautojen muodostaman kuormitusvaikutusten luotettavalle määrittämiselle.

Sähköautojen latauskuormituksen mallinnus perustuu tilastotietojen pohjalta rakennettuun tilastolliseen simulointimalliin. Tilastoaineistojen lisäksi mallin syötteenä käytettiin kylmälaboratoriossa tehtyjä sähköautojen latausmittauksia, joiden tavoitteena oli määrittää kylmien olosuhteiden vaikutus latauksen tehoprofiiliin ja energiasisältöön.

Projektin tuloksena havaittiin, että sähköautojen latauksen aiheuttama kuormitus on riippuvainen ulkolämpötilasta. Latauksen lisääntyvään kuormitukseen vaikuttaa autojen ajon aikaisen energiankulutuksen lisääntymisen lisäksi lataustapahtuman aikana tapahtuva akun lämmitys ja auton esilämmitys. Projektin tuloksia hyödynnetään sähköautojen latauksen suunnittelua avustavien ohjeistusten muodostamisessa.

Abstract

This research project aimed at providing further understanding of electric vehicle (EV) charging in a large parking area of housing cooperatives in a cold environment. Electrification of traffic is in the core of the energy transition as electric mobility is taking an increasing role in the private and public transportation. Novel powertrains such as the full electric powertrain require a supporting charging infrastructure. The present infrastructure has been designed to support loads that are very different from electric vehicle charging. Nevertheless, on the bright side, we may argue that the present power system, electricity transmission grid, and distribution grid are mostly sufficient for the job.

The report provides overview of the model and the modelling process of the EV charging in large charging areas in the cold environment. The model is based on the statistical data and the measurements conducted in large temperature-controlled vehicle technology laboratory. The aim of the measurements was to investigate the charging behavior of each vehicle under different ambient temperature operating conditions.

The results state that the charging behavior is dependent on the ambient temperature operating conditions. Also, energy consumption of the vehicles is heavily impacted by subzero temperatures. The results of the project are further utilized to develop the planning guidelines of the EV charging spots and areas.

SISÄLLYSLUETTELO

1	JOHDANTO	7
	1.1 Tutkimuksen tavoitteet.....	8
2	SÄHKÖAUTOJEN YLEISTYMINEN JA TOIMINTAYMPÄRISTÖN KUVAUS	11
	2.1 Sähköinen liikenne Suomessa.....	11
	2.2 Sähköisen liikenteen skenaariot.....	14
3	SÄHKÖAUTOJEN KUORMITUKSEN MUODOSTUMISEEN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT.....	15
4	SÄHKÖAUTOJEN LATAUKSEN AIHEUTTAMAN KUORMITUKSEN MALLINTAMINEN	25
5	HERKKYYSANALYYSI	30
	5.1 Olosuhdetekijöiden vaikutus autojen lataukseen	31
	5.2 Tulevaisuuden muutosilmiöt ja epävarmuus	33
6	ESIMERKIT JA MITOITUKSEN SUUNNITTELU	41
	6.1 Esimerkkitaloyhtiöt.....	41
	6.2 Liittymien kapasiteetin riittävyys	45
	6.3 Lämpötilan huomioiminen mitoituksessa	47
7	JOHTOPÄÄTÖKSET JA SUOSITUKSET	52
	7.1 Suositukset	53
	7.1.1 Lämpötilan huomiointi.....	53
	7.1.2 Älykkäät latausratkaisut ja latureiden teho	54
	7.1.3 Suunnitteluun liittyvä tausta-aineisto	54
	7.1.4 Oma liittymä.....	55
	7.1.5 Aiheeseen liittyvät ohjeistukset.....	55
	7.2 Jatkotutkimus	55
	LÄHDELUETTELO	57

1 Johdanto

Tämän tutkimushankkeen tavoitteena oli määrittää sähköautojen lataustapahtumien aiheuttama kuormitus kiinteistöverkoissa. Liikenteen sähköistyminen on yksi keskeisimmistä ja nopeimmin kehittyvästä energiainfrastruktuuriin vaikuttavasta kehitystrendistä. Huomioiden sähköverkkojen maltillisen uusiutumistahdin, on sähköautojen nopea yleistyminen luonut tarpeen sähköautojen muodostaman kuormitusvaikutusten luotettavalle määrittämiselle.

Sähköautojen latauksen ja latausalueiden vaatimuksia määrittelevä kansallinen lainsäädäntö noudattelee EU:n rakennusten energiatehokkuus direktiiviä (EUR-Lex, 2018). 11.10.2020 voimaan tullut laki rakennusten varustamisesta sähköajoneuvojen latauspisteillä ja latauspistevalmiuksilla sekä automaatio- ja ohjausjärjestelmillä. Laki edellyttää rakentamaan latauspisteitä tai valmiuden latauspisteille, mikäli kyse on laajamittaisesta rakennuksen korjaushankkeesta, joka kohdistuu rakennuksen lisäksi rakennuksen sähköjärjestelmään tai pysäköintipaikkoihin rakennuksen sisällä tai erillisellä pysäköintialueella. Kiinteistöverkkojen ja taloyhtiöiden sähköverkkojen kannalta on kriittistä, että velvoitteen ollessa voimassa voidaan rakentamisen suunnittelussa hyödyntää luotettavia mitoitusohjeistuksia. Ohjeistuksen ollessa ylimitoitettu voi se aiheuttaa tarpeetonta painetta ylimitoittaa kiinteistöjen tai taloyhtiöiden sähköverkoja. Kiinteistöjen latausalueen ylimitoitus johtaa ylisuureen lataus- tai kiinteistöliittymän tarpeeseen. Sähköjakeluverkkojen kannalta tilanne on haastava, sillä jakeluverkkoyhtiöiden on pystyttävä varautumaan asiakkaiden perusteltuun tai perusteettomaan kapasiteettiodotukseen. Oheinen asetelma voi helposti johtaa tilanteeseen, jossa sähköjakeluverkoissa varaudutaan ylisuureen kapasiteettiin ja kapasiteetin käyttöaste jää vähäiseksi.

Useat kotimaiset ja kansainväliset tutkimukset osoittavat, että latausten ajallinen vaihtelu voi olla suurta esimerkiksi asuinkiinteistöjen yhteydessä. Älykkäillä latausjärjestelyillä voidaan edelleen myötävaikuttaa latauskuormien järkevään jaksottumiseen ja kuormien huiputtumiseen. Sähköverkkojen maltillisempaan mitoittamiseen on siis lupaavat lähtökohdat.

Sähköautojen kuormitusvaikutukset ovat voimakkaasti automallikohtaisista yleistymisskenaarioista ja toimintaympäristöstä riippuvaisia. Tässä tutkimushankkeessa

kuormitusvaikutusten määrittäminen perustuu laboratorio- ja kenttäolosuhteissa tapahtuviin todellisiin mittauksiin sekä sähköautojen joukkokäyttäytymistä kuvaaviin simulaatiomalleihin. Tutkimuksessa hyödynnetään laaja-alaisesti erilaisia liikenne- ja henkilöliikennemittausaineistoja (mm. henkilöliikennetutkimusaineisto).

Tutkimustyö on toteutettu LUT-yliopiston johdolla. Metropolia ammattikorkeakoulu on tuottanut projektin tarpeisiin mittauksia.

Tutkimushankkeen tulokset palvelevat niin julkisen kuin yksityisenkin sähköenergiainfrastruktuurin (kiinteistöt, taloyhtiöt, kaupungit, sähkönjakeluverkot) kehittämisessä sähköisen liikenteen yleistyessä. Tulokset auttavat myös ymmärtämään älykkään latauksen merkityksen kuormitushuippujen välttämässä ja verkkojen mitoittamisessa. Tutkimustyön keskeiset kysymykset ja tulosten hyödynnettävyys on esitetty kuvassa 1.



Kuva 1. Tutkimustyön keskeiset tutkimusaiheet ja tulosten hyödynnettävyys.

1.1 Tutkimuksen tavoitteet

Tutkimuksen tavoitteena on määrittää sähköautojen latausprofiileja suomalaisissa olosuhteissa ja toimintaympäristöissä. Tulosten on tarkoitus toimia kansallisen sähköautojen latausinfra suunnitteluohjeistuksen tausta- ja tukimateriaalina.

Keskeisimmät tutkimuskysymykset ovat:

- Mikä on sähköauton latausteho ja -profiili?
- Miten sääolosuhteet vaikuttavat (ulkolämpötila) sähköautojen keskimääräisiin lataustehoihin sekä mahdolliseen ylläpitosähkön (akuston ja sisätilan lämmitys ja jäähdytys) tarpeeseen?
- Miten lataustapahtumat ja kuormitukset kerrostuvat erilaisissa ympäristöissä?
- Miten lataustehot näkyvät nykyisiä kiinteistöjen liittymäkuormia ja -kapasiteetteja vasten?
- Minkälaisia saneerauspaineita sähköautojen yleistyminen tuo liittymiin?
- Miten suuriin liittymien mitoitustehoihin päädytään edellisten kohtien pohjalta?
- Miten älykkäät latausratkaisut vaikuttavat latausalueiden mitoitustehoihin?

Tutkimuksessa tuotettavat tarkastelut perustuvat simulointeihin sekä todellisiin sähköautojen lataustehoa todentaviin mittauksiin. Simulointimalleissa hyödynnetään laaja-alaisesti todellisia verkkotietoja sekä sähkönkulutusta kuvaavia AMR -aineistoja (Automatic meter reading).

Sähköauton verkosta ottama teho vaihtelee voimakkaasti automallin ja olosuhteiden mukaan. Osana tutkimusprojektia suoritettiin sähköautojen lataustapahtumien tekniset mittaukset. Mittauksilla pyrittiin varmistamaan, että analyysien lopputuloksena tuotettavat mitoituseriaatteen perustuvat mahdollisimman realistisiin ja monipuolisiin lähtökohtiin. Luotettavat tutkimustulokset aihepiiristä ovat tärkeitä, sillä aiheeseen liittyy hyvin paljon virheellisiä käsityksiä ja olettamuksia. Mittaukset toteutettiin vakioiduissa olosuhteissa Metropolia AMK:n ajoneuvotekniikan kylmälaboratoriossa neljälle täyssähköautolle ja yhdelle ladattavalle hybridille.

Mittaustuloksia hyödynnettiin osana autojen latauksen aiheuttaman kuormituksen simulointimallia. Simulointimallin avulla voidaan ottaa kantaa ulkolämpötilan vaikutukseen ohjaamattoman sekä älykkään latausratkaisun tapauksessa. Mallissa sovelletaan ulkolämpötilan mukaan varioitavissa olevia latausprofiileja niin, että ne vastaavat simuloitavan kohteen toimintaympäristöä (esimerkiksi Etelä-Suomi vs. Pohjois-Suomi). Tuloksena muodostuu simulointimalleja sähköautojen latausprofiilien ja todennäköisen huipputehon määrittämiseen. Simulointimallit pystyvät yhdistämään monimuotoista taustamateriaalia ja tarjoavat mahdollisuuden varioida toimintaympäristöä ja muita lataustapahtumaan oleellisesti vaikuttavia muuttujia. Kehitettävät mallit mahdollistavat

sähköautojen aiheuttamien kuormien tarkastelun niin kiinteistöverkkojen kuin sähköjakeluverkkojen näkökulmista.

Tutkimuksen keskeisimpänä tavoitteena on sähköautojen latauksen huomioivien mitoitusperiaatteiden määrittäminen (yksityiset ja julkiset sähköverkot). Kattavalla joukolla simuloiteja pyritään vastaamaan mahdollisimman hyvin todenmukaisia latausolosuhteita varioiden mm. sähköautomalleja (latauslaitteen teho ja auton akkukoko), ajomääriä (ajoenergia), latausajankohtia (latauksen aloitusajankohta) sekä ulkolämpötilatietoja. Simuloinnein määritettyjä lataustehoja arvioidaan nykyisiä liittymäkapasiteettejä vasten, jolloin sähköautojen aiheuttama tulevaisuuden verkkojen saneeraustarve on arvioitavissa sekä kiinteistöverkkojen että sähköverkkoyhtiöiden liittymämitoittamisen näkökulmista.

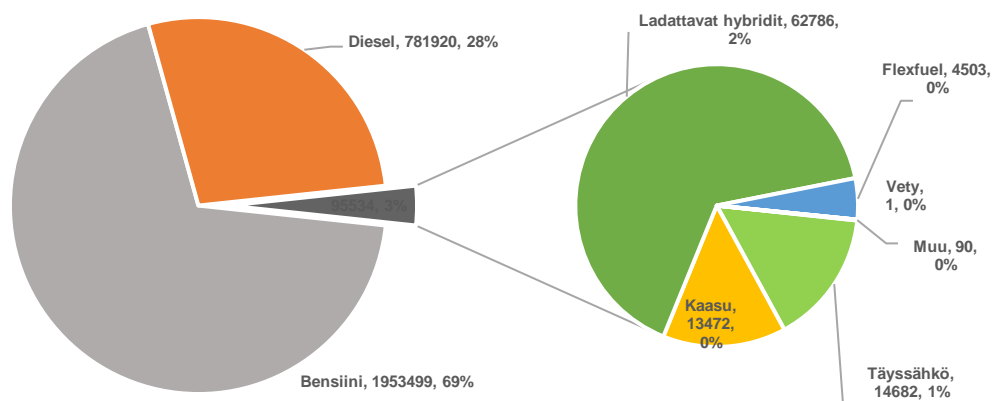
Tässä raportissa esitetään projektin ydintulokset ja simulointimallin avulla tuotetun herkkyyksianalyysin tulosaineistoa. Projektin raportointia tukee diplomityö, jossa on kuvattu syvemmin aiheeseen liittyvää taustaa ja simulointimallin toteutusta (Kalenius, 2021). Lisäksi raporttia tukee erillinen mittausraportti, jossa on kuvattu neljän täyssähköauton ja yhden ladattavan hybridin kylmälaboratoriomittausten mittausrutiinia ja mittauksen tulosaineistoa (Tikka, et al., 2021).

2 Sähköautojen yleistymisen ja toimintaympäristön kuvaus

Sähköinen liikenne yleistyy nopealla tahdilla Suomessa ja maailmalla. Liikenteen sähköistyminen aiheuttaa muutospainetta energia- ja sähköinfrastruktuurille. Suurin huomio kiinnittyy sähkönjakeluun, sillä sähköisen liikenteen energianjakelu tulee tapahtumaan sähkönjakeluverkkoja hyödyntäen. Suomen ja Pohjoismaiden tapauksessa sähköisen liikenteen yleistymiseen liittyy erityispiirteitä, joista ulkolämpötila on yksi merkittävimpiä. Tutkimuksen tavoitteena on valottaa ulkolämpötilan vaikutusta sähköautojen latauksen mitoittamiseen, suunnitteluun ja sähköverkkovaikutuksiin. Tutkimuksen pääpaino on lämpötilavaikutuksen sisällyttämisessä mallinnukseen ja mallinnuksen lähtötietojen huolellinen kuvaaminen ja herkkyyksanalyysitarkastelu. Tässä luvussa keskitytään kuvaamaan sähköautojen yleistymistä ja eri tahojen esittämiä skenaarioita ja tavoitteita sähköiseen liikenteeseen liittyen. Lisäksi tarkastellaan asuinkiinteistöjen sähköverkkojen vapaan kapasiteetin riittävyyttä liittymämitoituksen ja pääsulakekoon näkökulmasta.

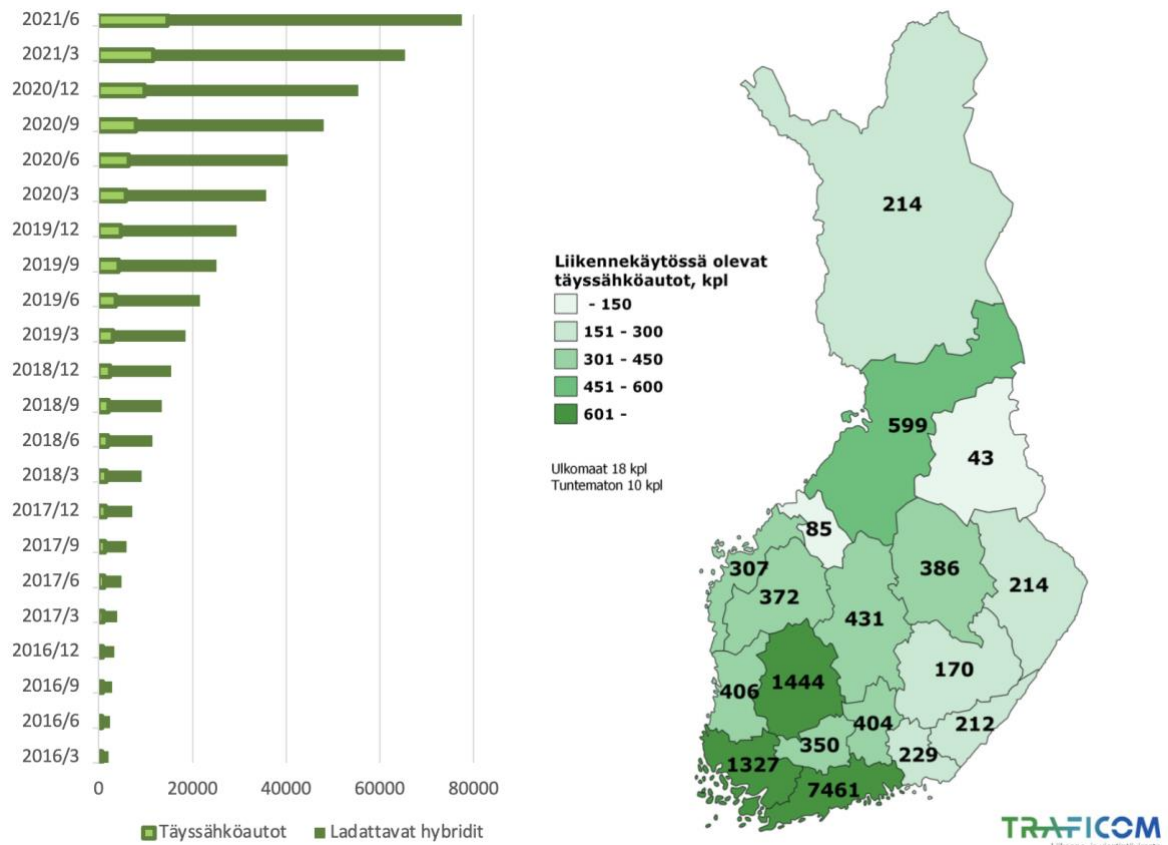
2.1 Sähköinen liikenne Suomessa

Sähköisen liikenteen yleistymisen on alkanut vuosikymmeniä sitten, mutta merkittäviä määriä sähköajoneuvoja liikenteessä on nähty vasta muutaman kuluneen vuoden aikana. Suomen henkilöautokannassa oli 2021 kesäkuun lopussa 14 682 täyssähköautoa ja 62 789 ladattavaa hybridiä (Traficom, 2021). Kuvassa 2 on esitetty liikennekäytössä olevien henkilöautojen osuudet jaoteltuna käyttövoimittain.



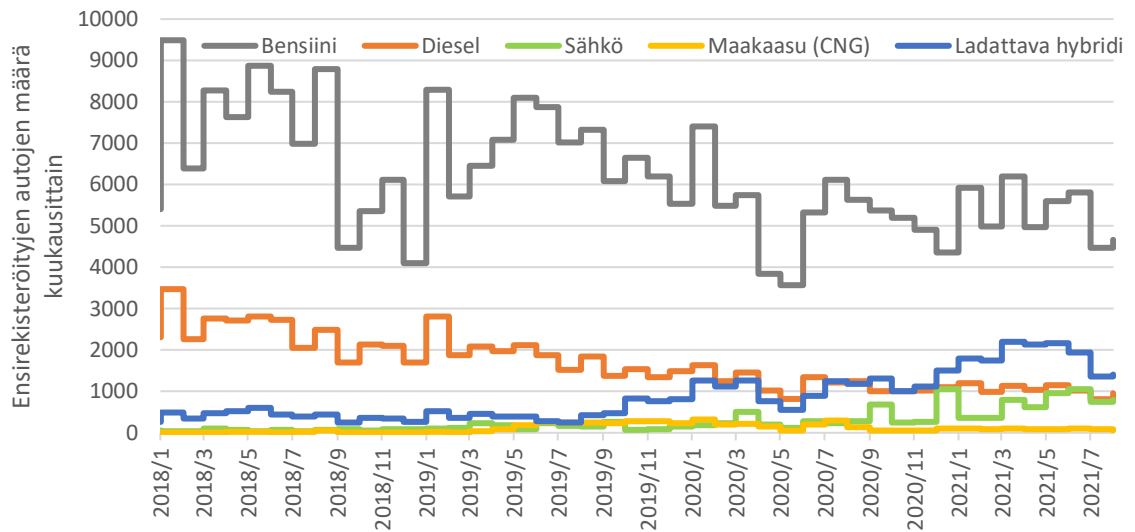
Kuva 2. Liikenteessä olevien henkilöautojen määrä Suomessa 2021 kesäkuun lopussa. Määrät jaoteltuna autojen käyttövoiman mukaan. Kuvaajassa on esitetty ensin kunkin käyttövoiman rekisteröityjen ajoneuvojen kappalemäärä ja suhteellinen osuus koko henkilöautoajoneuvokannasta. (Traficom, 2021)

Sähköisen liikenteen yleistymistähti on ollut varsin nopeaa, kuten kuvan 3 tilastosta voidaan todeta. Täyssähköautojen jakauma maakunnittain noudattaa pääsääntöisesti väestöjakaumaa, joten suurimmat ajoneuvomäärät esiintyvät Uudellamaalla, Varsinais-Suomessa, Pirkanmaalla ja Pohjois-Pohjanmaalla.



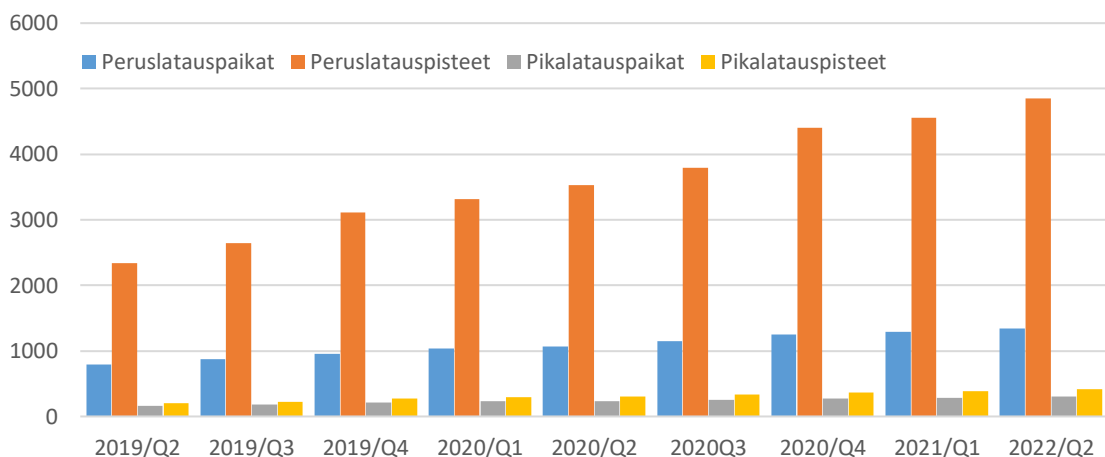
Kuva 3. Täyssähköautojen ja ladattavien hybridien määrä Suomessa 2021 kesäkuun lopussa. Karttakuvassa täyssähköautojen ja ladattavien hybridien jakautuminen maakunnittain 2021 kesäkuun lopussa. (Traficom, 2021)

Ajoneuvojen käyttövoimajakauksessa on myös havaittavissa selkeä muutos sähköisen liikenteen suuntaan. Kuvassa 4 voidaan huomata lataushybridien ja täyssähköautojen markkinaosuuden merkittävä kasvu. Lataushybridien markkinaosuus ylitti dieselautojen ensirekisteröintimäärän ensimmäistä kertaa alkuvuodesta 2020 ja on pysynyt sen jälkeen joko samalla tasolla tai korkeammalla dieselautojen ensirekisteröinteihin verrattuna. Täyssähköautojen markkinaosuuksissa on havaittavissa myös selkeää nousua. Dieselautojen markkinaosuus on jatkanut laskemista ja samalla täyssähköautojen osuus on jatkanut kasvamistaan ohittaen dieselautojen markkinaosuuden kesäkuussa 2021.



Kuva 4. Henkilöautojen ensirekisteröinnit käyttövoimittain kuukaudessa 2018–2021. Kuvassa ei ole esitetty ensirekisteröintejä käyttövoimia osalta, joiden ensirekisteröintien määrä on vähäinen.

Autojen sähköistyessä kiihtyvällä tahdilla myös latausverkkoon on panostettu lisääntyvissä määrin. Suomessa on 1337 julkista peruslatauspaikkaa, joissa oli yhteensä 4853 latauspistettä 2021 kesäkuun loppuun mennessä. Myös pikalatausverkosto, eli yli 50 kW tehoisten latauspaikkojen määrä on lisääntynyt merkittävästi, ollen 301 vuoden 2021 kesäkuussa. Kuvassa 5 on esitetty latauspaikkojen määrän kehittyminen kuluneen kolmen vuoden aikana. (Sähköinen liikenne ry, 2021)



Kuva 5. Sähköautojen latauspisteiden määrän kehitys vuosina 2019–2021. Aineistossa ei ole huomioitu Teslan latauspisteitä (Destination Charing, 98 kpl ja Super Charger, 66 kpl). (Sähköinen liikenne ry, 2021)

2.2 Sähköisen liikenteen skenaariot

Sähköisen liikenteen yleistymisen taustalla merkittävänä vaikuttajana on poliittiset päätökset, yhteiskunnan tuki ja keskusteluilmapiiri. Poliittisessa keskustelussa on ollut pitkään esillä ilmastoteot ja kestävä kehityksen tukeminen. Liikenteen rooli Suomen ympäristövaikutusten kokonaisuudessa on merkittävä (noin 21 % vuotuisista CO₂ - päästöistä 2019) (Tilastokeskus, 2021), joten sähköinen liikenne on keskeisessä osassa ilmastokuormituksen kestävyysratkaisua.

Liikenne- ja viestintäministeriö on laatinut liikenteen muutokselle tiekartan, jossa esitetään tavoitteita ja tukitoimia vuosille 2030 ja 2045. Tiekartan tavoitteena on saada 700 000 sähköautoa sekä lisäksi 4600 raskasta sähköajoneuvoa liikenteeseen vuoteen 2030 mennessä. Autojen hankintaa edistetään jatkamalla henkilöautojen hankintatukea, sekä korottamalla tukisummaa. Tuen lisäksi käytetään ohjaustoimenpiteitä, joilla voidaan velvoittaa vähäpäästöisten ajoneuvojen hankinta ajoneuvo- ja palveluhankintojen yhteydessä. Tavoitteisiin on kirjattu lisäksi, että jokaiselle autolle on oltava mahdollisuus kytkeä auto latauspisteeseen yön yli tapahtuvaan lataukseen. Tiekartta suosittaa tukien korottamista liikennesähkön ja -kaasun julkiseen jakeluinfrastruktuuriin, sekä yksityisen latausinfraan tukeen taloyhtiöille. Taloyhtiölle suunnattu tuki tullaan lisäksi laajentamaan kattamaan työpaikkojen latauspaikat ja -pisteet. (Liikenne- ja viestintäministeriö, 2021)

3 Sähköautojen kuormituksen muodostumiseen vaikuttavat tekijät

Tässä luvussa keskitytään käsittelemään ajoneuvojen latauksen mallintamiseen liittyvien tausta-aineistojen käytettävyyttä mallinnuksen tarpeisiin. Oheisen tausta-aineiston käsittelyyn tukevaa materiaalia on esitetty myös projektin osana tehdyssä diplomityössä (Kalenius, 2021). Tässä luvussa esitetään tarkempi katsaus muuttujista ja aineistoista, joita on käsitelty luvussa 5 *Herkkyyksianalyysi*.

On sanomattakin selvää, että sähköautojen latauskuormituksen arvioinnissa on laaja joukko muuttujia, joiden huomioiminen on ensiarvoisen tärkeää. Sähköauto eroaa tavanomaisesta kuormituksesta, sillä sen energiankulutus ei tapahdu samassa paikassa, josta energia ladataan akkuun. Lisäksi auto voi liikkua ja olla latauksessa useassa eri jakeluverkon sijainnissa. Auton latauksen teho ei ole aina riippuvainen auton laturista, vaan voi esimerkiksi olla rajoittunut latauslaitteen tehorajan vuoksi. Lisäksi autoa voidaan ladata suuritehoisilla tasavirtalatauspisteillä.

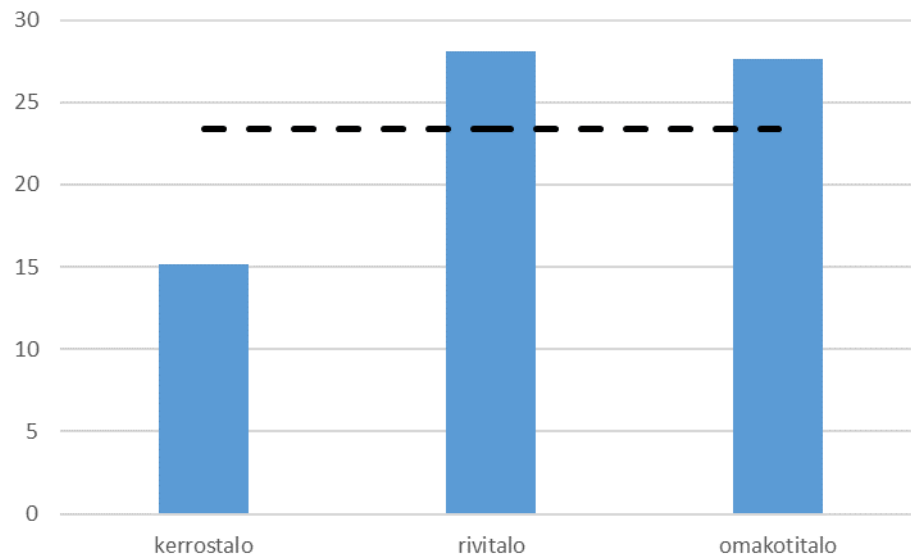
Ilmiöiden mallinnuksessa on oleellista huomioida myös mahdolliset muutostekijät, jotka muuttavat mallinnuksen lopputuloksia lyhyellä tai keskipitkällä aikavälillä. Autojen latauksen mallinnuksen eteen on tehty joukko tutkimuksia, joiden perusteella voidaan muodostaa hyvä kuva autoilun vaikutuksista suurempaan asiakasmassaan. Esimerkiksi Rautiainen et al. on esittänyt tapoja mallintaa sähköautojen latausta henkilöliikennetutkimusten perusteella (Rautiainen, et al., 2012). Vastaavaan aineistoon perustuvaa tilastollista mallinnusta on esitetty muissakin artikkeleissa (Tikka, et al., 2011). Oheisten esimerkkien mallinnuksen lähdeaineistona toimi lähes ainoastaan henkilöliikennetutkimus. On kuitenkin perusteltua pyrkiä sisällyttämään mallinnukseen syötteitä myös muista lähteistä. Mallinnuksen kannalta oleellisina lähtötietoina voidaan pitää seuraavia:

- Ajosuoritetilastot
 - Suoritteiden pituuden jakauma
 - Saapumis- ja lähtöaikojen jakaumat
 - Sosioekonomiset tunnuspiirteet
- Ajoneuvojen latauksen tekniset reunaehdot
 - Ajoneuvojen latureiden nimellisteho ja muut rajoitteet
 - Latauspisteen ja latausalueen tekniset reunaehdot

- Latauksen hyötysuhde ja tehohäviöt
- Lataustapahtuman energiasisällön lämpötilariippuvuuden tilastot
- Ajoneuvojen energiankäyttö
 - Ajoneuvojen energiankäytön tilastot
 - Ajoneuvojen energiankäytön lämpötilariippuvuuden tilastot
- Latauskäyttäytymisen tilastot
 - Latauksen ajoittaminen kotikiinteistössä
 - Latauksen osuus muissa kohteissa
- Ympäristöolosuhteet
 - Rakennuksen tai alueen käyttötarkoitus
 - Kohteen taustakuorma (erityisesti älykkään ohjauksen yhteydessä)

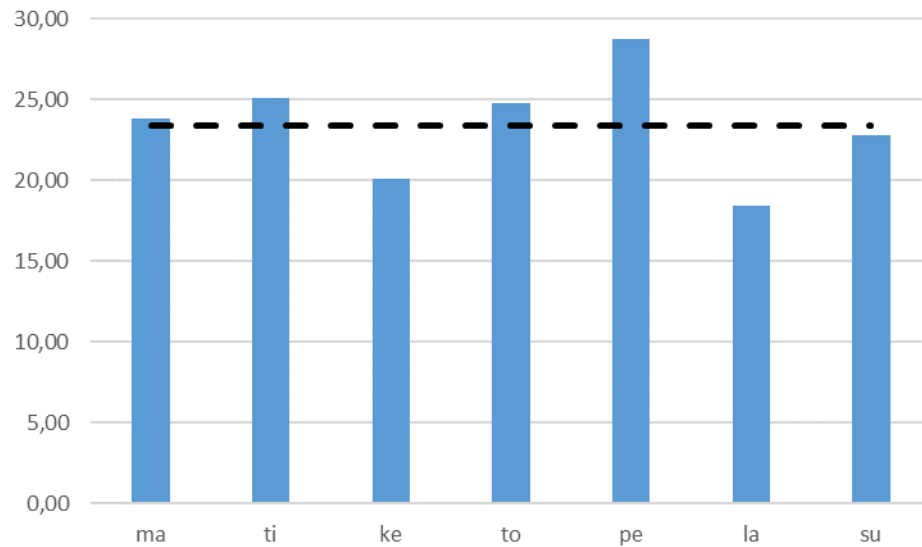
Tilastoaineistoja on saatavilla useista lähteistä. Osa aineistoista sopii hyvin käytettäväksi sähköautojen latauskuormituksen mallinnukseen. Aineistojen valinnassa on pyritty huomioimaan, että mallinnuksen luotettavuus olisi mahdollisimman hyvä myös yleistymisen jatkuessa pidemmälle. Tästä syystä mallinuksessa on pyritty välttämään aineistoja, jotka kuvaavat sähköisen liikenteen pioneerien autoilu- ja liikkumistottumuksia. Tämän kaltaisina aineistoina voidaan pitää esimerkiksi latausoperaattoreiden tilastoja, vaikka otos kattaa suuren osan sähköisestä liikenteestä on vaikea osoittaa miten hyvin se kuvaa laajempaa populaatiota, joka ei vielä ole siirtynyt sähköiseen käyttövoimaan.

Mallinnus tukeutuu pääasiassa uusimpaan saatavilla olevaan henkilöliikennetutkimukseen, joka on julkaistu 2016 (Liikennevirasto, 2018). Tutkimuksen raaka-aineistosta on mahdollista muodostaa tilastot, henkilöiden saapumis- ja lähtöajoille eri kohteista. Lisäksi tutkimuksen perusteella voidaan muodostaa tilasto keskimääräisen ajosuoritteen päiväkohtaisesta summasta eri asumismuodon mukaan, kuten kuvassa 6 havainnollistetaan.



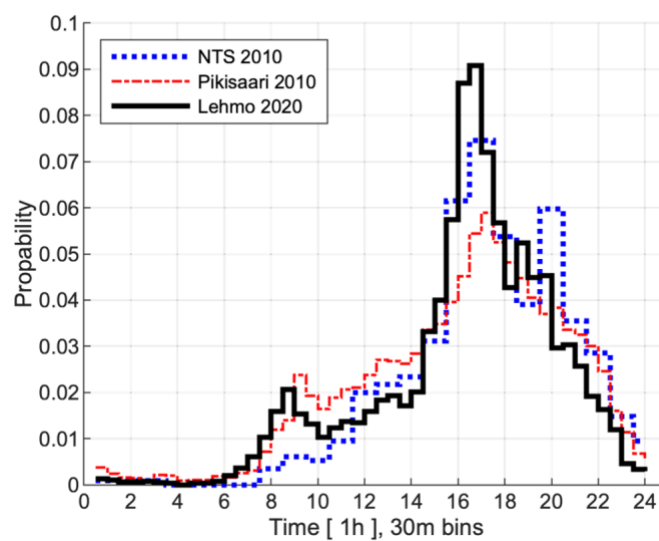
Kuva 6. Keskimääräiset henkilöautolla (kuljettaja) tehdyt ajosuoritteet eri asuintavoilla. Katkoviivalla on merkitty keskiarvo. Luvuissa mukana kaikki henkilöt, myös ne, joilta ei ajosuoritetta muodostu. Katkoviivalla merkitty keskiarvo. (Liikennevirasto, 2018) (Kalenius, 2021)

Päiväkohtaisten ajosuoritteiden määrä vaikuttaa latauksen energiasisältöön ja sitä kautta myös latausalueen huipputehoon. Myös viikonpäivien välillä on jonkin verran vaihtelua, mutta merkittävimmän eron aineistossa muodostaa asumismuoto. Kuvassa 7 havainnollistetaan viikonpäivien välillä tapahtuvaa vaihtelua.



Kuva 7. Henkilö- ja pakettiautoilla tehdyn ajosuoritteen jakaantuminen eri viikonpäiville. Luvuissa mukana kaikki henkilöt, myös ne, joilta ei ajosuoritetta muodostu. Katkoviivalla merkitty keskiarvo. (Liikennevirasto, 2018) (Kalenius, 2021)

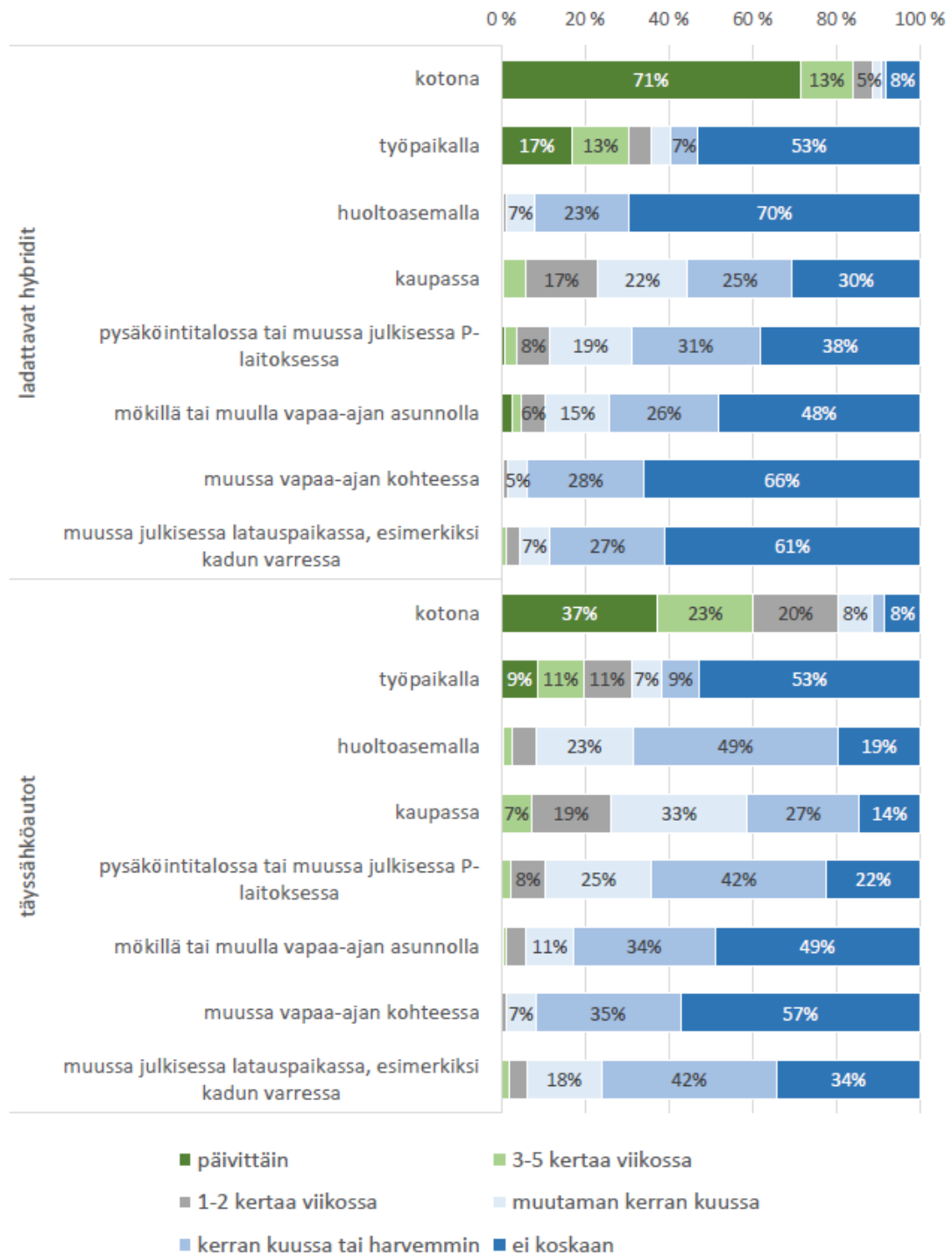
Latauksen ajoittumisen mallinnukseen voidaan käyttää saapumisaikojen jakaumia, jotka muodostetaan henkilöliikennetutkimuksen pohjalta. Erikoistapauksissa on mahdollista hyödyntää jakaumia, jotka ovat mitattu kohteesta tai kohteen lähiympäristöstä, kuten kuvassa 8 on esitetty.



Kuva 8. Liikennemittaukseen ja henkilöliikennetutkimukseen [NTS 2010] (Liikennevirasto, 2010) perustuvien aineistojen perusteella muodostettuja saapumisaikajakaumia.

Kyseisessä esimerkissä on mitattu liikennettä kaupunkialueen läheisyydessä sijaitsevalta kerrostaloalueelta (Pikisaari) ja omakotitaloalueelta (Lehmo). Voidaan havaita, että mittausten jakaumat ovat hyvin saman kaltaisia henkilöliikennetutkimuksesta johdetun jakauman kanssa. Jakaumista nähdään selkeästi, että kotiin saavutaan pääasiassa neljän jälkeen, jonka jälkeen jakauman esittämä kotiin saapumisen todennäköisyys laskee iltatunteja kohden.

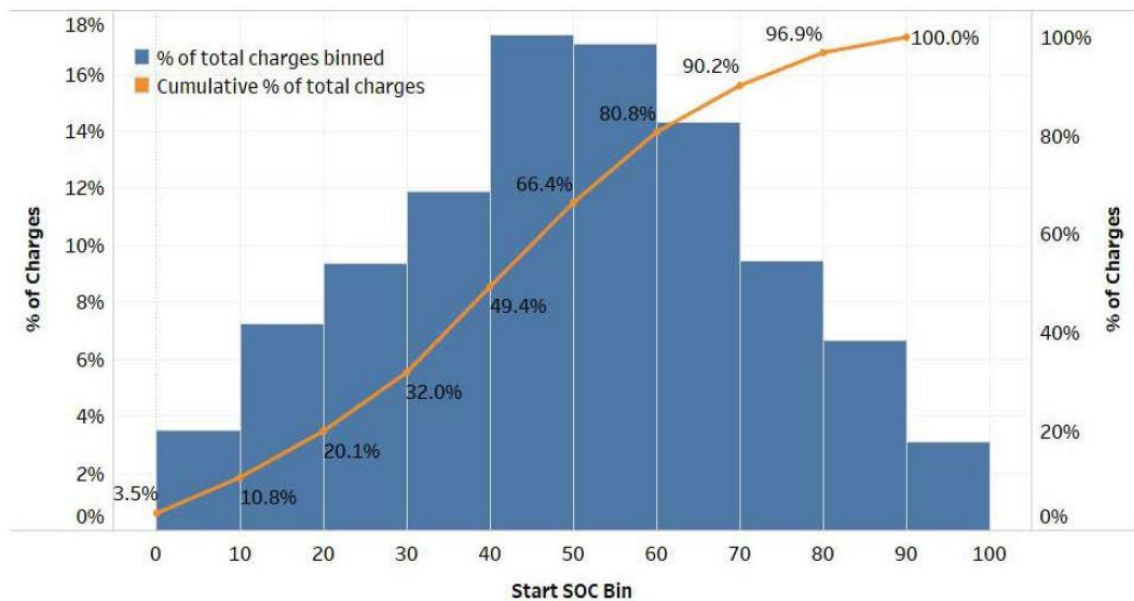
Sähköisen liikenteen vaikutusten arvioinnin kannalta on myös tärkeä tarkastella miten autoja ladataan. Autojen lataustottumusten aineistot ovat otos nykyisten sähköautoilijoiden auton käyttötottumuksista. Tämän kaltaisten aineistojen muodostaminen isommalle populaatiolle ei ole mahdollista, joten on tehtävä oletus, että sähköautoilijoiden ensimmäinen joukko edustaa isoa massaa sähköisen liikenteen yleistyessä. Kuvassa 9 on esitetty Autoalan Tiedotuskeskuksen kyselyn tulokset, jossa on kysytty täyssähköautojen ja ladattavien hybridien lataustottumuksia.



Kuva 9. Latauskertojen yleisyys eri kohteissa. Kyselytutkimuksen aineisto lataushybridit n = 1790 kpl ja täyssähköauto n = 409 kpl. (Autoalan Tiedostuskeskus, 2020)

Tilastosta käy hyvin ilmi, että autoja ladataan pääsääntöisesti kotona. Toiseksi yleisin latauspaikka on työpaikka. Tulosten perusteella voidaan myös havaita, että lataus ei aina ole päivittäinen rutiini. Tätä väittämää tukee myös EPRI:n tekemä tutkimus autojen latauksesta, jossa on todettu käyttäjien lataavan autoja vasta kun akun varaus on laskenut merkittävästi

(Electric Power Research Institute (EPRI), 2018). Kuvassa 10 on havainnollistettu akun varastilan suhdetta hetkeen, jolloin auto kytkentään lataukseen. On hyvä huomata, että kyseiseen tutkimuksen autojoukon keskimääräinen akkukoko on pienempi verrattuna nykyisiin myynissä oleviin uusiin autoihin. Tutkimus kuitenkin antaa olettaa, että kuluttajat eivät käytä jokaista mahdollisuutta ladata autoa, jos akussa on riittävästi varausta jäljellä.



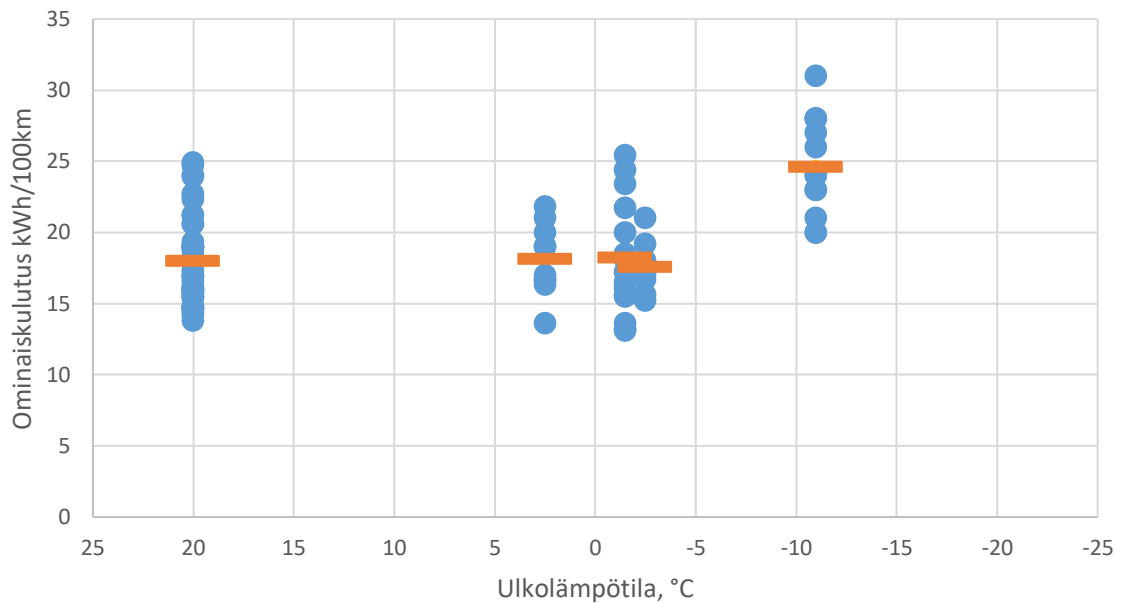
Kuva 10. Täyssähköautoilla lataustapahtuman alussa oleva akun varaustila esitetty pylväin ja vasemman puolen pysty akselin asteikolla. Latauksien kumulatiivinen kertymä esitetty viivalla ja oikean puolen pysty akselin asteikolla. (Electric Power Research Institute (EPRI), 2018)

Ajomäärien ja käyttäytymisen ohella autojen latauksen aiheuttama kuormitus on riippuvainen autojen latureiden ja akkujen lämpötilariippuvuudesta ja autojen kulutuksesta kylmissä olosuhteissa. Tutkimusraportissa ”Technical report: Measurements of cold climate EV charging” esitetään, että autojen latauksen kokonaisenergiasisältö on riippuvainen ulkolämpötilasta (Tikka, et al., 2021). Raportin mittausaineiston havaintoja on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Kylmälaboratoriossa testattujen autojen verkosta ottaman latausenergian muutos lämpötilan funktion. *Mittauksessa ei ole saavutettu täyttä akun varausta. **Lataus kylmäsäilytyksen jälkeen. (Tikka, et al., 2021)

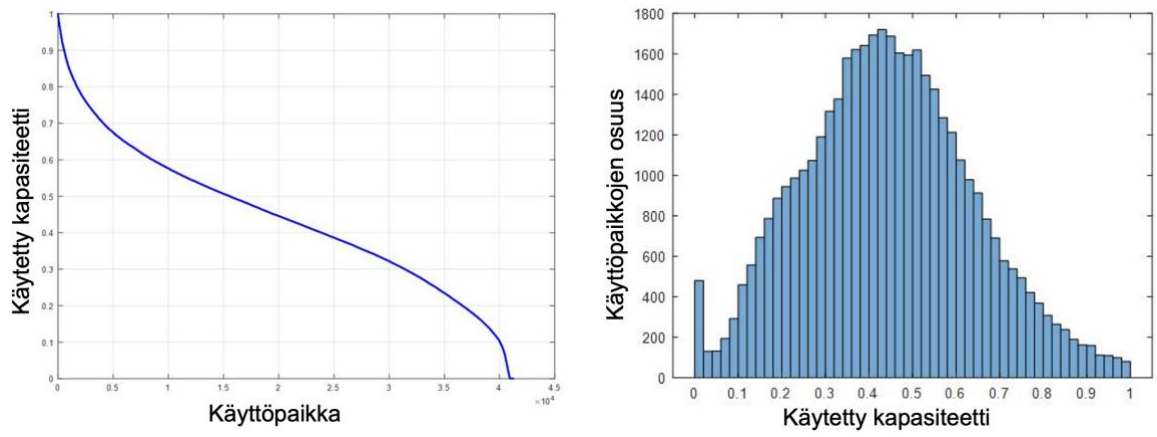
Car	Testing temperature				
	20 °C kWh (%)	0 °C kWh (%)	-10 °C kWh (%)	-20 °C kWh (%)	-20 °C** kWh (%)
Tesla model S P85	15.7	15.6 (-1)	15.7 (0)	16.7 (6)	23.6 (33)
Nissan Leaf	20.3	17.8 (-14)	18.3 (-11)	15.3 (-33)	15.6* (-30)
Volkswagen ID.3	13.0	12.4 (-5)	12.6 (-3)	12.6 (-3)	15.0 (13)
Kia e-Niro	23.3	23.0 (-1)	25.5 (9)	24.3 (4)	27.5 (15)
Volvo V60 T6 Recharge	10.3	10.2 (-1)	10.0 (-3)	9.7 (-6)	7.6* (-36)

Voidaan todeta, että kylmissä olosuhteissa lataaminen vaikuttaa merkittävästi lataustapahtuman kokonaisenergiasisältöön. Tutkimuksessa havainnoitiin vain lataustapahtuman energiasisällön muutosta, mutta ei ajoneuvojen ajon aikaista kulutusta. Kylmät olosuhteet vaikuttavat latauksen energiasisältöön usean eri mekanismin seurauksena. Merkittävimmät lisäenergiasisällöt muodostuvat akkujen lisääntyneen lämmitysenergian kysynnän seurauksena. Osatehoilla ladattaessa latureiden huonompi hyötysuhde aiheuttaa vaikuttaa myös kokonaisenergian kertymään. Lisäksi akkukemia vaikuttaa akun lämpötilariippuvaisiin ominaisuuksiin. Lisäksi on hyvä huomata, että ilman akunlämmittintä olevien autojen latauksenenergiasisältö voi olla laskea kylmissä olosuhteissa, sillä akkua ei välttämättä aina pystytä varaamaan täyteen kapasiteettiin asti. Lataustapahtuman lisäksi energiankulutus muuttuu ajosuorituksen aikana, joten kylmien olosuhteiden mitoitusta tarkasteltaessa on lisäksi otettava huomioon ajosuorituksen aikaiset muutokset kulutuksessa. Kuvassa 11 havainnollistetaan Norjan autoliiton ja Tekniikan maailman tekemien kulutusmittausten tuloksia, on hyvä huomioida, että mittauksia ei ole suoritettu laboratorio-olosuhteissa. Kulutuksen muutos kylmissä olosuhteissa on testien mukaan merkittävä. Selkeä muutos kulutuksessa tapahtuu noin 0 °C lämpötilan kohdalla, josta kulutus lähtee nousemaan. Teoria tukee ilmiötä, sillä kylmissä olosuhteissa ajoneuvon matkustamon lämmittäminen vie merkittävässä määrin energiaa. Sähköautoissa on hyvin vähän hyödynnettävissä olevia häviöenergiälähteitä, joten matkustamon lämmittämiseen käytettävä energia on otettava akusta. Lisäksi on mahdollista, että kylmissä olosuhteissa auton akku tarvitsee lämmitystä, joka osaltaan lisää energiankulutusta.



Kuva 11. Eri automallien virallisten ja mitattujen käytännön ominaiskulutuksien suuruus eri testeissä. Virallinen ominaiskulutus ilmoitettu 23 °C lämpötilassa, Norjan autoliiton tekemät mittaukset nollan tienoilla ja Tekniikan maailman mittaukset -11 °C. Käytännön kulutusmittauksissa käytetty mittausjaksojen aikaista lämpötilan keskiarvoa. Viivalla merkitty keskiarvo. (Norwegian Automobile Federation (NAF), 2021) (Tekniikan Maailma (TM), 2021) (Tekniikan Maailma (TM), 2019)

Sähköautojen yleistymisen kannalta on tarve tarkastella myös asiakkaan sähköverkkoa. Asiakkaiden sähköverkkojen tilannetta voidaan kuvata esimerkiksi vapaalla tehokapasiteetilla, eli laskemalla huipputehon ja pääsulakkeen salliman suurimman tehon suhde. Kuvassa 12 on esitetty erään maaseutuvaltaisen jakeluyhtiön 41262 omakotitalon käyttöpaikan vapaan kapasiteetin jakaumat, joiden tarkastelussa on käytetty AMR - tuntisarjoja. Voidaan todeta, että omakotitalojen tapauksessa kapasiteetin käyttö on kohtuullisen korkeaa ja voi aiheuttaa ongelmia sähköisen liikenteen yleistymisen myötä. Kuvaajasta ei kuitenkaan voida vetää pitkälle johdettua johtopäätöstä, sillä autojen aiheuttama latauskuormitus on monen muuttujan summa. Raportissa esitetään jäljempänä vastaavia koostekuvaajia rivitalo- ja kerrostalokohteista.



Kuva 12. Esimerkki omakotitalojen vapaasta tehokapasiteetista huipputehotunnin kohdalla. Vasemmalla kuvassa pysyvyyskäyrä ja oikealla jakauma.

4 Sähköautojen latauksen aiheuttaman kuormituksen mallintaminen

Tutkimuksen analyysit perustuvat tilastolliseen simulointimalliin, jonka syötteenä on laaja joukko tilastoaineistoja. Malli on toteutettu tapahtumapohjaisena Monte Carlo simulaationa, jossa sähköautojen lataustapahtumia on arvottu satunnaisesti lähtöaineistojen perusteella. Jokainen arvontakierros on uniikki ja edustaa satunnaistapahtumaa, jonka ominaisuudet määräytyvät syöteaineistojen perusteella. Tässä raportissa esitetään mallin ja mallinnuksen pääpiirteet, mallinnuksen tarkka kuvaus on esitetty projektin yhteydessä tehdyssä diplomityössä (Kalenius, 2021).

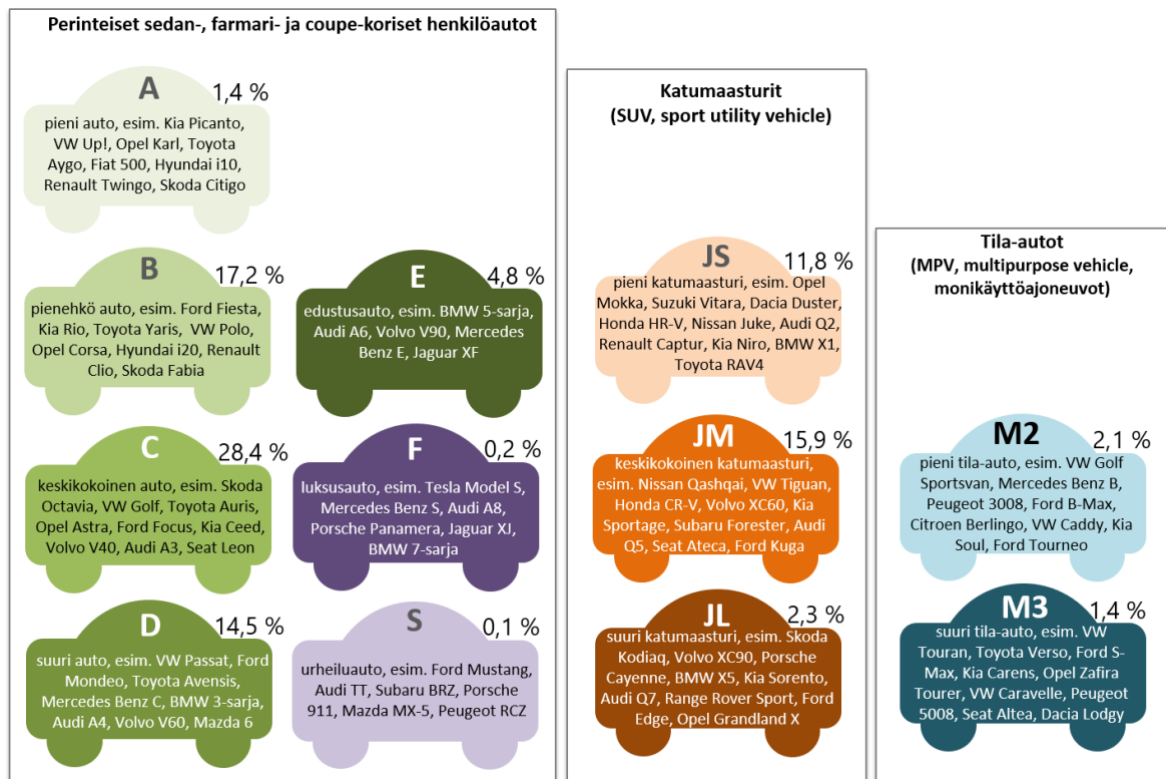
Mallinnukseen on pyritty sisällyttämään mahdollisimman paljon autoilutottumuksia ja auton käyttöön liittyviä muuttujia ja tilastoaineistoja. Taulukossa 2 esitetään malliin valitut aineistot.

Taulukko 2. Taulukossa on esitetty simuloinnissa käytetyt lähtötiedot ja aineistot.

Tekijä	Tarkennus
Ajoneuvot ja olosuhteet	<ul style="list-style-type: none"> • latausprofiili • ominaiskulutus ja ajon rytmittymisen vaikutus (kWh/100km) • akun / sisätilojen esilämmitysprofiili • akun koko
Ajosuorite	<ul style="list-style-type: none"> • päiväkohtainen ajosuorite • lähtöajankohdan ajoittuminen • saapumisajankohdan ajoittuminen • päiväkohtainen liikkumattomuus
Latauskäyttäytyminen	akun varaustilan vaikutus latauskytkennän todennäköisyyteen skenaariotarkastelu
Latausympäristö	<ul style="list-style-type: none"> • talotyyppi • kohteen taustakuorma • kohteen sähkökapasiteetti

Ajoneuvojen lataus- ja esilämmitysprofiilina on käytetty laboratoriomittauksiin (Tikka, et al., 2021) perustuvaa aineistoa, jota on skaalattu vastaamaan simulointimallin tuottamaa ajosuoritteen kokonaisenergiantarvetta. Skaalauksen skaalaus on toteutettu pidentämällä tai lyhentämällä latauksen vakioteho-osuutta. Ajoneuvojen ominaiskulutus perustuu analyysiin, joka on tehty perustuen Autoalan Tiedotuskeskuksen (Autoalan Tiedostuskeskus, 2021)

(Kuva 13), Tekniikan maailman (Tekniikan Maailma (TM), 2021) (Tekniikan Maailma (TM), 2019) ja Norjan Autoliiton (Norwegian Automobile Federation (NAF), 2021) käyttötestien aineistoihin. Käyttötestien aineisto on esitetty luvussa 15 kuvassa Kuva 11.



Kuva 13. Eri autosegmentit ja esimerkkejä autosegmentteihin kuuluvista automalleista. Alkuperäiseen kuvaan lisätty autosegmentin keskimääräinen prosentiosuus vuosien 2016–2020 aikana ensirekisteröidyistä henkilöautoista. (Autoalan Tiedostuskeskus, 2021)

Ajoneuvojen mittausaineisojen käyttö on sovitettu vastamaan ajoneuvojen segmenttikohtaisia osuuksia, jotta mittauksiin pohjautuva mallinnus kuvaisi nykyistä automassaa mahdollisemman tarkasti. Mallinnuksessa on oletettu, että ajoneuvosegmenttien osuudet eivät muutu nopeasti.

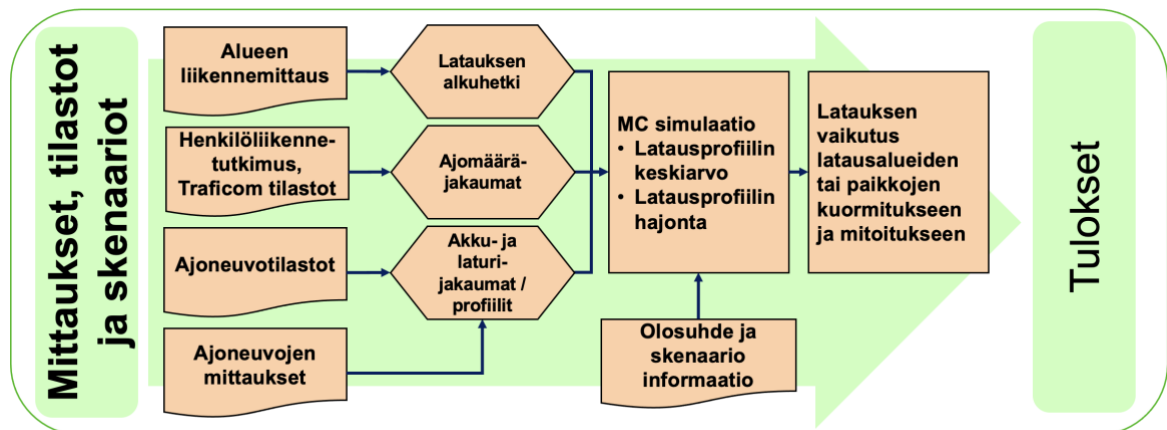
Simuloinnissa käytetty akun koko on valittu siten että akun koko ei vaikuttaisi simuloinnin tuloksiin merkittävästi. On oletettu, että ajoneuvojen akun koko on yksi ajoneuvojen hankintaa ohjaava tekijä, joten pidempiä ajosuoritteita tekevät henkilöt pyrkivät valitsemaan ajoneuvoja, joissa on suurempi akku.

Ajosuoritteiden mallinnus perustuu puhtaasti viimeisimmän saataville olevan henkilöliikennetutkimuksen kyselyaineistoon, josta on suodatettu seuraavat jakaumat:

päiväkohtainen ajosuorite, lähtöajankohdan ajoittuminen, saapumisajankohdan ajoittuminen ja päiväkohtainen liikkumattomuus. Aineistoa on avattu luvussa 3 ja yksityiskohtaisemmin diplomityössä (Kalenius, 2021).

Latauskäyttäytymisen mallinnuksen syötteenä on käytetty aiheeseen liittyvien tutkimusten tuloksia (Electric Power Research Institute (EPRI), 2018) (Autoalan Tiedostuskeskus, 2020). Aineistojen perusteella on pyritty määrittämään keskimääräinen tapa ladata autoja. Autojen lataustottumusten vaikutusta on analysoitu luvussa 5 *Herkkyyshanalyysi*.

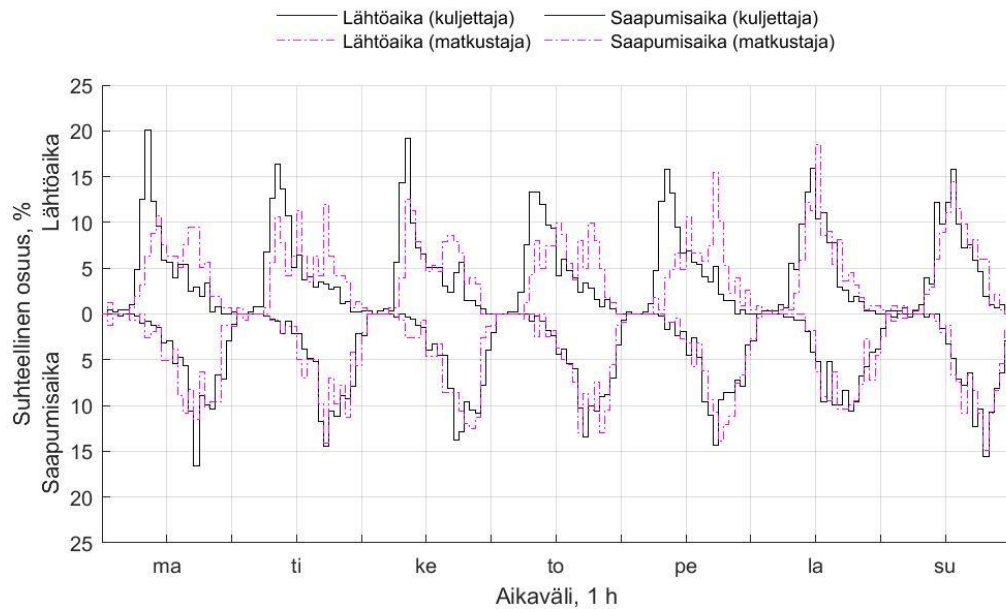
Lisäksi älykkään latausratkaisun mallinnuksen yhteydessä mallin syötteenä on käytetty kohdekohtaisia aineistoja, jotta latauksen ohjausta on voitu ajoittaa taustakuormituksen perusteella. Älykkäällä latausratkaisulla tarkoitetaan tässä tutkimuksessa ohjausta, joka pyrkii rajoittamaan latauskuormituksen ennalta määrättyyn tehorajaan. Simulointimalli pyrkii estimoimaan pienimmän mahdollisen tehorajan, jolla autojen lataus toteutuu täysimääräisesti. Tulokset esitetään 99 % luottamustasolla. Mallinnuksen yksinkertaistettu rakenne ja kulku on esitetty kuvassa 14.



Kuva 14. Yksinkertaistettu havainnekuva simulaatiosta.

Mallinnus alkaa aineistojen suodatuksesta ja esikäsittelystä, jotta niitä voidaan käyttää tilastollisen simulointimallin tarpeisiin. Valtaosa aineistoista esitetään mallille todennäköisyysjakaumina. Todennäköisyysjakaumasta muodostetaan kertymäfunktio, josta arvotaan satunnaistapahtumia käyttäen satunnaislukugenerointia, joka tuottaa tasajakautuneita satunnaisnumeroita. Simulointimalli tuottaa kuillakin kierroksella yhden syötejakaumiin pohjautuvan lataustapahtuma. Satunnaistapahtumia arvotaan, kunnes

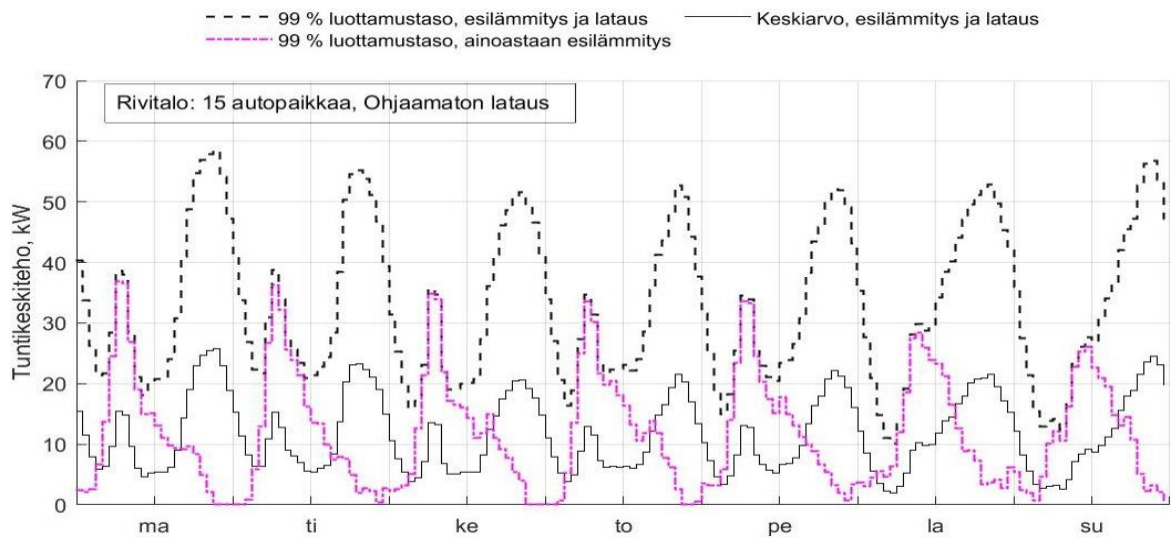
latausprofiilin keskiarvo alkaa vakiintua. Kuvassa 15 on esitetty esimerkki henkilöliikennetutkimuksesta suodatetusta aineistosta.



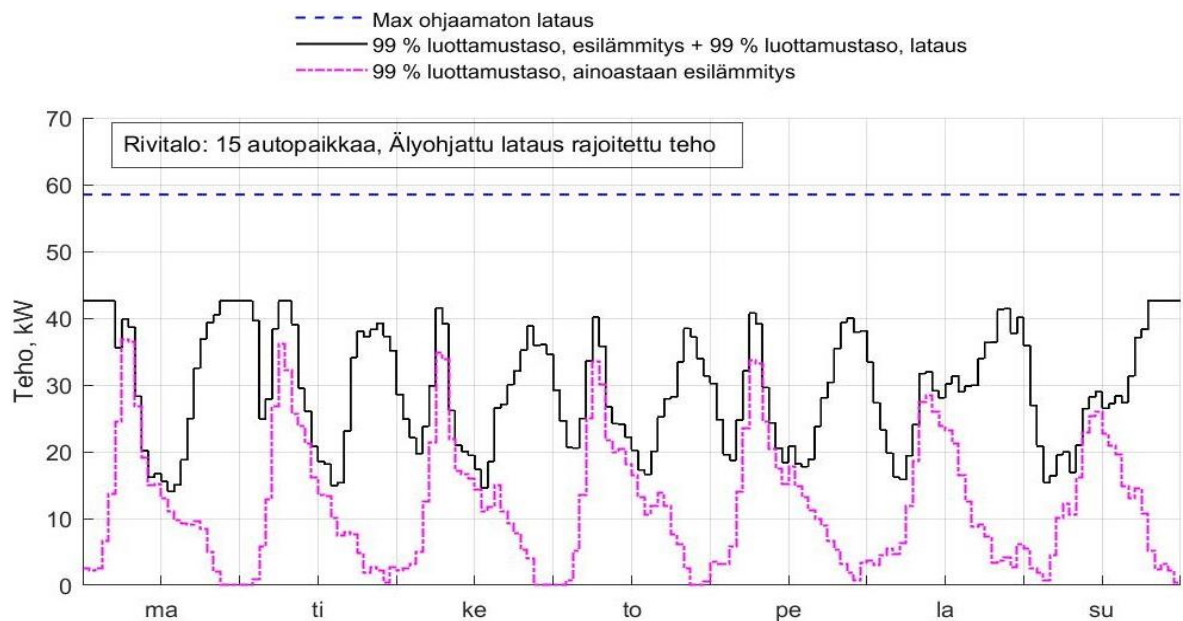
Kuva 15. Henkilöliikennetutkimuksen raaka-aineistosta suodatettu tilasto matkojen alku- ja päättymisajoista. (Liikennevirasto, 2018)

Mallinnuksessa hyödynnetään ainoastaan aineistoa, joka kuvaa kuljettajan toimintaa. Kuvasta voidaan myös todeta, että arkipäivien välillä ei ole suurta eroa, mutta viikonloppun päivien profiilit eroavat jonkin verran arkipäivistä.

Kuvissa 16 ja 17 on esitetty simulointimallin tuottama lataus- ja esilämmitysprofiili. Kuvissa on eritelty ohjaamaton ja älykkäästi ohjattu latausjärjestelmä. Älykkäästi ohjatun järjestelmän kuvaan on merkitty ohjaamattoman järjestelmän huipputeho vertailun helpottamiseksi.



Kuva 16. Esimerkki simulointimallin tuottamasta lataus ja esilämmitysprofiilista. Kuvaajan aika-akselin viikonpäivä merkintä on keskellä vuorokautta.



Kuva 17. Esimerkki simulointimallin tuottamasta lataus ja esilämmitysprofiilista. Kuvajan aika-akselin viikonpäivä merkintä on keskellä vuorokautta.

Esimerkkien mallinnus on laskettu lähtöaineistoilla, jotka kuvaavat 15 ajoneuvon rivitalokohdetta $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ lämpötilassa. Älykkään latauksen esimerkissä on havaittavissa latauksen siirtyminen yön tunneille. Tehorajaa laskettaessa lataustapahtuman päällekkäisyys esilämmityksen kanssa muodostuu rajoittavaksi tekijäksi. Kuvaajien profiilien pinta-alat, jotka on esitetty 99 % luottamustasolla eivät kuvaan latauksen kokonaisenergisäilyä. Ohjaamattoman latauksen keskiarvokuvaajaa voidaan käyttää energiasäilyksen estimointiin.

5 Herkkyysanalyysi

Autojen lataamiseen vaikuttavien tekijöiden joukko on suuri, mutta kaikki taustatekijät ja muuttujat eivät ole huipputehon tai energian kannalta yhtä kriittisiä. Tässä luvussa käsitellään eri muuttujien vaikutusta sähköautojen latauksen huipputehohon. Esimerkeissä on käytetty 10, 30 ja 50 autopaikan kokoista kohdetta, jossa jokainen autopaikka on varustettu latauspisteellä.

Mallinnuksen lähtötietojen määrittelyssä on pyritty valitsemaan muuttujat siten että ne edustaisivat mahdollisimman hyvin keskimääräistä lataustarvetta talviolosuhteissa. Muuttujien alkuarvot määriteltiin seuraavasti:

- Ulkolämpötila: -20 °C
- Sähköautojen ominaiskulutus: 32,3 kWh/100km (-20 °C)
- Akkukapasiteetin maksimiraja: 70 kWh
- Latausteho: 11 kW
- Luottamustaso: 99 %
- Lisäksi:
 - Esilämmitys ja latauskäyrät, jotka on mitattu -20 °C lämpötilassa
 - Latauskäyttäytyminen (sisältäen kytkennän todennäköisyys riippuvainen akun varaustilasta) (Kalenius, 2021)
 - Talotyypistä riippuva ajosuorite ja ajoittumisen aineisto

Simuloinnin lähtöarvoissa valittiin ulkolämpötilaksi -20 °C, sillä kylmät olosuhteet ovat mitoituksen kannalta kriittisimmässä roolissa. Vastaavasti sähköautojen keskimääräinen kulutus valittiin vastaamaan mahdollisimman hyvin samaa mitoitusolosuhdetta. Ajoneuvojen kylmien olosuhteiden kulutusmittauksista on vähän tieteellistä aineistoa, mutta jonkin verran lehdistön ja yhteisöjen tuottamaa aineistoa (Tekniikan Maailma (TM), 2019) (Tekniikan Maailma (TM), 2021) (Norwegian Automobile Federation (NAF), 2021). Teoreettinen tarkastelu kulutuksen ja lämpötilan suhteesta tukee lehdistön ja yhteisöjen julkaisemia tuloksia, joten keskimääräiseksi kulutukseksi valittiin 32,3 kWh/100 km keskihajonnalla 3 kWh/100 km.

Autojen akkukapasiteetin rajoittaminen vaikuttaa simulointimallissa lähinnä erittäin pitkien ajosuoritteiden rajoittumiseen ja osittain valitun latauskäyttäytymisen toteutumiseen. Kapasiteetti on kuitenkin valittu riittävän suureksi, jotta se ei aiheuta vääristymää tilastollisten ajosuoritemäärien käytön kannalta.

Tässä herkkyysanalyysitarkastelussa on oletettu, että yksittäisen latauspisteen nimellisteho on 11 kW. Tämä on hyvin linjassa taloyhtiöitä ja suurempia kiinteistöjä koskevien suositusten kanssa. Latauksen 11 kW nimellisteho ei tarkoita, että kaikki autot hyödyntäisivät latauslaitteen maksimitehon. Autojen latausprofiileina on käytetty kylmälaboratoriossa mitattujen autojen latauksen tehoprofiileja (Tikka, et al., 2021). Latausprofiilin vakioehto-osuutta on skaalattu simulointimallissa vastaamaan kulloisenkin satunnaistapahtuman lataustarpeen energiasisältöä. Latausprofiilien loppuosan laskeva tehoprofiili on sen jälkeen lisätty vakioehto-osuuden perään. Lataustapahtuman kokonaisenergisäily vastaa kulloisenkin simulointikierron tilastoon perustuvan satunnaistapahtuman edellyttämää energiasisältöä.

Autopaikkojen käyttöaste on riippuvainen kohdetyypistä. Kerrostalokohteen tapauksessa on oletettu, että autopaikkoja on 0,8 kappaletta jokaista asuntoa kohden. Tämä oletus skaalaa henkilöliikennetutkimuksen aineiston liikkumistarvetta lineaarisesti pienemmäksi, joka vaikuttaa suoraan liittymässä oletettujen sähköautojen ja niiden latauspisteiden määrään. Rivitalojen tapauksessa vastaava kerroin on 1,4.

Mallinnuksen eri tekijöiden ja lähtötietojen vaikutusta mallinnettuun ohjaamattoman latausjärjestelmän huipputuntitehoon tai älykkäästi ohjatun latausjärjestelmän tehorajaan on tutkittu herkkyysanalyysin avulla. Herkkyysanalyysissä on muutettu yksittäistä tekijää tai lähtötietoa samalla kun muut tekijät on pidetty muuttamattomina. Herkkyysanalyysillä saatuja tuloksia voidaan käyttää myös eri muuttujien arvoilla perustavan mitoitusohjeistuksen tukena. Herkkyysanalyysi on jaettu kahteen osaan, joista ensimmäinen on olosuhdetekijöiden vaikutus latauksen huipputehoon. Osiossa tarkastellaan ulkolämpötilan vaikutusta huipputehon muodostumiseen. Tarkastelussa ei ole eritelty latauksen ja ajosuorituksen energiankulutuksen muutosta, sillä molempien muutosten vaikutus lopputulokseen on sama. Toisessa osiossa tarkastellaan tulevaisuuden muutostekijäitä, kuten akkukoon, laturin nimellistehon, liikkumisen ja lataustottumusten vaikutusta latauksen huipputehoon. Lisäksi tarkastellaan luottamustason vaikutusta huipputehon muodostumiseen.

5.1 Olosuhdetekijöiden vaikutus autojen lataukseen

Sähköautojen ominaiskulutuksella on merkittävä vaikutus muodostuvan latausenergian määrään ja siitä syntyvään latausjärjestelmän kuormitukseen. Tarkastelussa ei ole eritelty

kylmissä olosuhteissa muodostuvaa suurempaa latauskuormitusta, sillä sen vaikutus on vastaava ajosuoritteen energiankulutuksen kasvuun nähden. Esimerkin tarkoitus on valottaa kokonaisenergiämäärän muutosta lataustapahtumien huipputehon muodostumiseen. Erittäin suurilla energiankulutuslukemilla on mahdollista, että simuloinnissa käytetty akkukapasiteetti rajoittaa energiakertymää, mutta tämän ilmiön vaikutus huipputehon muodostumiseen on maltillinen. Sähköautojen keskimääräisen ominaiskulutuksen vaikutusta mallinnuksen tulokseen on esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3. Keskimääräisen ominaiskulutuksen vaikutus mallinnetun ohjaamattoman latausjärjestelmän huipputuntitehoon tai älykkään latausjärjestelmän tehoraajaan kerrostaloissa, hajonta normaalijakaantuneessa energiankulutuksessa 3 kWh/100km.

Keskimääräinen energiankulutus	Huipputuntitehon / Latausjärjestelmän tehorajan muutos, %					
	Kerrostalot, ohjaamaton lataus pysäköintipaikkoja, kpl			Kerrostalot, älykäs lataus pysäköintipaikkoja, kpl		
	10	30	50	10	30	50
39 kWh/100km	9,2	11,7	10,1	9,4	11,8	13,9
32 kWh/100km	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
25 kWh/100km	-13,3	-14,4	-12,3	-11,7	-13,3	-14,4
18 kWh/100km	-26,0	-31,3	-28,7	-17,5	-21,5	-21,8

Energiankulutuksen vaikutus on merkittävä, sillä pienellä 18 kWh/100 km kulutuksella huipputeho on 17–32 % alhaisempi verrattuna 32 kWh/100 km verkkotilanteeseen. Energiankulutuksen suhteellinen muutos edellisessä vertailussa oli noin -40 %. Vastaavasti, jos energiankulutus kasvaa, suurentuu myös latausten yhteenlaskettu huipputeho. Huipputehon suhteellinen muutos on noin puolet energiankulutuksen suhteelliseen muutokseen verrattuna. Älykkään latauksen tapauksessa huipputehon suhteellinen kasvu on hieman suurempi kuin ohjaamattoman latauksen tapauksessa, mutta on hyvä huomata, että älykkään latauksen absoluuttinen huipputehon kasvu on merkittävästi pienempi kuin ohjaamattoman latauksen.

Taulukko 4. Keskimääräisen ominaiskulutuksen vaikutus mallinnetun ohjaamattoman latausjärjestelmän huipputuntitehoon tai älykkään latausjärjestelmän tehorajaan rivitaloissa, hajonta normaalijakaantuneessa energiankulutuksessa 3 kWh/100km.

Keskimääräinen energiankulutus	Huipputuntitehon / Latausjärjestelmän tehorajan muutos, %					
	Rivitalot, ohjaamaton lataus pysäköintipaikkoja, kpl			Rivitalot, älykäs lataus pysäköintipaikkoja, kpl		
	10	30	50	10	30	50
39 kWh/100km	10,1	17,3	11,9	13,9	14,4	15,4
32 kWh/100km	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
25 kWh/100km	-	-12,4	-11,0	-6,0	-11,5	-11,7
18 kWh/100km	-	-24,8	-25,5	-6,0	-11,5	-13,8

Rivitalokohteen analyysi osoittaa hyvin samankaltaisia ilmiötä kerrostalokohteen analyysiin verrattuna ja muutosten suuruusluokka on hyvin lähellä toisiaan. Rivitalokohde reagoi hieman maltillisemmin keskimääräisen energiankulutuksen pienentämiseen ja hieman enemmän energiamäärän kasvattamiseen. Yhteenvetona voidaan todeta, että lataustapahtumaan kumuloituva energiamäärä on tärkeässä roolissa mitoitusta suunniteltaessa. Energiamäärän kasvu voi johtua ajosuoritteiden pidentymisestä tai lataustapahtuman energiamäärän lisääntymisestä. Lataustapahtuman energiasisältöön vaikuttaa erityisesti akkujen latauksen aikainen lämmittäminen. Äärimmäisen kylmissä olosuhteissa on myös syytä huomioida, että aamutunneille ajoittuva auton esilämmityksen energiasisältö voi aiheuttaa päällekkäisyyttä lataustapahtuman lopussa.

5.2 Tulevaisuuden muutosilmiöt ja epävarmuus

Autojen energiankäytön ohella lataustapahtuman huipputehoon vaikuttaa oleellisesti myös akkukoko, latauslaitteen nimellisteho, latauskäyttäytyminen ja liikkuminen. Lisäksi tuloksia voidaan esittää eri tilastollisilla luottamustasoilla, joiden tarkoitus on kuvata tapahtuman todennäköisyyttä. Ensimmäinen herkkyysanalyysin muuttuja on auton akkukoko, joka on varioitu välillä 50–110 kWh vertailutason ollessa 70 kWh. Taulukossa 5 on esitetty akkukoon vaikutus huipputehon muodostumiseen.

Taulukko 5. Sähköautojen akkukoon vaikutus mallinnetun ohjaamattoman latausjärjestelmän huipputuntitehoon tai älykkään latausjärjestelmän tehorajaan kerrostaloissa.

Akkukoko	Huipputuntitehon / Latausjärjestelmän tehorajan muutos, %					
	Kerrostalot, ohjaamaton lataus pysäköintipaikkoja, kpl			Kerrostalot, älykäs lataus pysäköintipaikkoja, kpl		
	10	30	50	10	30	50
110 kWh	-6,0	-7,7	-3,7	7,8	5,9	4,0
90 kWh	-3,6	-6,1	-3,2	4,8	0,0	3,8
70 kWh	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
50 kWh	-0,8	-1,3	3,5	-10,1	-10,4	-7,6

Voidaan havaita, että osa huipputehosta leikkautuu pois pienillä akkukapasiteeteilla. Leikkaantuminen on seurausta tilastollisesti vähälukuisten pitkien päivämatkasuoritteiden suuresta energiatarpeesta. Käytännössä kyseessä on matkasuoritteita, joiden tapauksessa voidaan pitää todennäköisenä, että autoa on muutenkin tarve ladata muualla kuin kotona. Akkukoon ja energiankulutuksen laskennassa on huomioitu lataustapahtuman kokonaishäviönä 10 % eli esimerkiksi 90 kWh akkuun tarvitaan 100 kWh latausenergiaa verkosta. Taulukossa 6 on esitetty sama herkkyyksianalyysitarkastelu rivitalokohteen tapauksessa. Tulokset ovat hyvin samankaltaisia kerrostalokohteen kanssa. Koska rivitalokohteen tilastollinen ajosuorite on hieman suurempi, kasvaa huipputeho hieman enemmän suurien akkukokojen tapauksessa. Kokonaisuuden kannalta akkukoon vaikutus latauksen huipputehon muodostumiseen ei ole kovin merkittävä. Lisäksi on hyvä huomioida myös, että henkilöiden liikkumistarpeet voivat ohjata autojen valintaperusteita. Näin ollen, paljon liikkuvat voivat päätyä valitsemaan autoja, joissa on isompi akkukapasiteetti.

Taulukko 6. Sähköautojen akkukoon vaikutus mallinnetun ohjaamattoman latausjärjestelmän huipputuntitehoon tai älykkään latausjärjestelmän tehorajaan rivitaloissa.

Akkukoko	Huipputuntitehon / Latausjärjestelmän tehorajan muutos, %					
	Rivitalot, ohjaamaton lataus pysäköintipaikkoja, kpl			Rivitalot, älykäs lataus pysäköintipaikkoja, kpl		
	10	30	50	10	30	50
110 kWh	-4,1	-0,7	-2,7	13,9	8,6	10,2
90 kWh	-1,3	-0,2	1,9	10,5	6,9	6,6
70 kWh	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
50 kWh	0,2	-0,1	3,4	-6,9	-7,9	-7,0

Laturin nimellisteho vaikuttaa osaltaan myös koko latausalueen huipputehon muodostumiseen. Taulukossa 7 on esitetty laturin nimellistehon vaikutus rivitalokohteen tapauksessa. Autojen aiheuttama huipputeho laskee ohjaamattoman latauksen tapauksessa merkittävästi, jos laturin nimellistehoa rajoitetaan.

Taulukko 7. Lataustehon vaikutus mallinnetun ohjaamattoman latausjärjestelmän huipputuntitehoon tai älykkään latausjärjestelmän tehorajaan kerrostaloissa.

Latausteho	Huipputuntitehon / Latausjärjestelmän tehorajan muutos, %					
	Kerrostalot, ohjaamaton lataus pysäköintipaikkoja, kpl			Kerrostalot, älykäs lataus pysäköintipaikkoja, kpl		
	10	30	50	10	30	50
22 kW	-0,0	-1,8	1,1	-1,0	0,0	-0,1
11 kW	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
6,7 kW	-23,6	-21,9	-16,1	0,7	-3,0	-2,0
3,7 kW	-39,4	-34,6	-33,6	-14,3	-8,7	-9,1

Nimellistehon rajoittaminen on toimiva ratkaisu ohjaamattoman latauksen tapauksessa, mutta se myös rajoittaa yön aikana saatavilla olevaa kokonaisenergiaa. Isommalla latausalueella muutos on hieman maltillisempi, sillä suurempien lataustehojen tapauksessa kuormien luontaisen risteilyn määrä korostuu. Vastaavasti, kun suuren latausalueen laturien nimellistehoa lasketaan, laskee myös kuormien risteilyn mahdollisuus, sillä lataustapahtumien ajallinen kesto muuttuu samassa suhteessa.

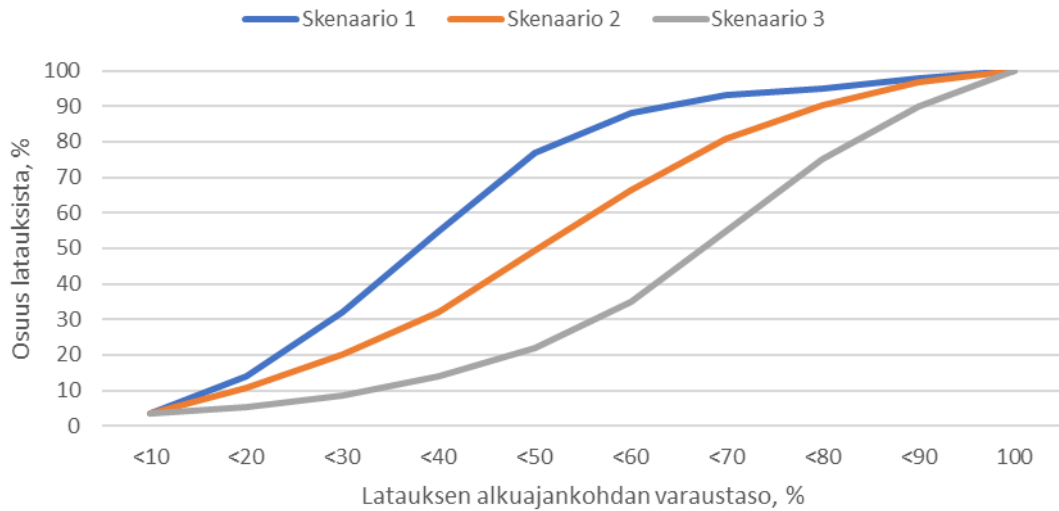
Älykkäästi ohjatun latauksen tapauksessa laturin nimellistehon merkitys ei ole huipputehon kannalta kriittinen, sillä älykkään latauksen kannalta oleellisempi muuttuja on lataustapahtumien energiasisältö. Laturin nimellistehon kasvattaminen yli 11 kW:n ei ole yleensä ole perusteltua, jos kohde on tavanomainen asuinkäyttöön tarkoitettu taloyhtiö. Simuloinnissa ei havaittu merkittävää muutosta, kun laturin nimellistehoa kasvatettiin yli 11 kW:n rajan. On myös hyvä huomata, että yli 11 kW lataustehoa hyödyntäviä ajoneuvoja ole kovin suurta joukkoa (poissulkien DC-lataus). Vastaava analyysi toteutettiin myös rivitalokohteille, kuten taulukossa 8 on esitetty.

Taulukko 8. Lataustehon vaikutus mallinnetun ohjaamattoman latausjärjestelmän huipputuntitehoon tai älykkään latausjärjestelmän tehorajaan rivitaloissa

Latausteho	Huipputuntitehon / Latausjärjestelmän tehorajan muutos, %					
	Rivitalot, ohjaamaton lataus pysäköintipaikkoja, kpl			Rivitalot, älykäs lataus pysäköintipaikkoja, kpl		
	10	30	50	10	30	50
22 kW	1,4	-0,5	5,6	1,8	-1,4	2,2
11 kW	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
6,7 kW	-19,8	-16,8	-17,0	14,2	2,2	4,9
3,7 kW	-35,2	-29,2	-28,5	-5,7	-1,0	0,5

Rivitalokohteen tulokset noudattelevat pääosin kerrostalokohteen tuloksia. Rivitalokohteen älykkäästi ohjatun latauksen tapauksessa 10 auton tapauksen tulokset ovat suhteellisina arvoina haastavia tulkita, sillä autojen yhteenlaskettu teho vaikuttaa ensin kasvavan, kun teho lasketaan 6,7 kW tasolle, jonka jälkeen teho laskee hieman 11 kW verrokkitapaukseen verrattuna. Käytännössä ilmiö aiheutuu autojen aamuisen esilämmityksen ja latauksen päällekkäisyydestä. Isommilla tehoilla lataus on mahdollista suorittaa yön aikana, eikä esilämmityksen kanssa muodostu päällekkäisyyttä. Kun yksittäisten laturien tehoa lasketaan ei latauksia ole mahdollista vuorotella yhtä tehokkaasti kuin isommilla laturien nimellistehoilla. Kun laturien tahoraja lasketaan 3,7 kW tasolle huipputeho laskee, mutta kaikkien autojen akkuja ei välttämättä pystytä lataamaan täyteen. Älykkäästi ohjatun latauksen ja ohjaamattoman latauksen absoluuttiset huipputehot ovat lähes samalla tasolla, kun laturien teho rajoitetaan 3,7 kW tehoon.

Latauksen huipputehon muodostumista tarkasteltiin myös latauskäyttäytymisen näkökulmasta. Tutkimuksessa oletettiin, että autojen akkuja ei ladata aina kun auto saapuu kotiparkkipaikalle. Vertailutasona käytettiin Yhdysvalloissa tehtyä tutkimusta, jossa oli tarkasteltu millä varaustasolla autot tyypillisesti kytketään lataukseen. Kuvassa 18 on havainnollistettu mallinnuksessa käytettyjä skenaarioita. Skenaario 2 on oletustaso kaikissa tutkimuksessa esitetyissä tuloksissa. Lisäksi simulointimallissa oli niin sanottu tarkistussilmukka, joka jätti skenaariokuvaajan huomioimatta, jos akun varaus ei ollut riittävä seuraavan päivän ajosuoritteeseen.



Kuva 18. Autojen akkujen varaustason suhde lataustapahtuman todennäköisyyteen.

Taulukoissa 9 ja 10 on havainnollistettu latauskäyttäytymisskenaarioiden vaikutusta kerrostalo ja rivitalokohteissa. Latauskäyttäytyminen ei ole huipputehon muodostumisen kannalta merkittävä tekijä. Normaalisti poikkeavien tapahtumien yhteydessä joukkokäyttäytymisen rooli voi kuitenkin muodostua merkittäväksi.

Taulukko 9. Latauskäyttäytymisen vaikutus mallinnetun ohjaamattoman latausjärjestelmän huipputuntitehoon tai älykkään latausjärjestelmän tehorajaan kerrostaloissa

Latauskäytt äytyminen	Huipputuntitehon / Latausjärjestelmän tehorajan muutos, %					
	Kerrostalot, ohjaamaton lataus pysäköintipaikkoja, kpl			Kerrostalot, älykäs lataus pysäköintipaikkoja, kpl		
	10	30	50	10	30	50
Skenaario 1	-0,6	-3,9	-3,3	2,0	0,7	1,2
Skenaario 2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Skenaario 3	-0,9	-0,5	0,5	-6,1	-4,4	-3,6

Taulukko 10. Latauskäyttäjyksen vaikutus mallinnetun ohjaamattoman latausjärjestelmän huipputunteihin tai älykkään latausjärjestelmän tehoraajaan rivitaloissa

Latauskäyttäjyminen	Huipputunteihin / Latausjärjestelmän tehorajan muutos, %					
	Rivitalot, ohjaamaton lataus pysäköintipaikkoja, kpl			Rivitalot, älykäs lataus pysäköintipaikkoja, kpl		
	10	30	50	10	30	50
Skenaario 1	-1,0	0,7	4,3	5,7	2,9	9,1
Skenaario 2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Skenaario 3	-0,2	1,7	4,1	0,0	2,2	-0,1

Käyttäjyksen muutokset voivat myös esiintyä liikkumismäärien muutoksina. Ohessa on tarkasteltu keskimääräisen liikkuvuuden vaikutusta autojen latauksen aiheuttamaan huipputehohon. Lähtötasona on käytetty henkilöliikennetutkimuksesta suodatettua aineistoa, joka kuvaa autoilijoiden keskimääräistä liikkumista kerrostalo ja rivitalo kohteissa. Tilasto on esitetty taulukossa 11. Liikkumistottumukset ovat molemmissa tapauksissa melko samankaltaiset, eikä myöskään viikonpäivien välillä ole havaittavissa suuria poikkeamia. Herkkyysanalyysissä tarkastellaan miten liikkumismäärän muutos vaikuttaa latauksen muodostaman huipputehon suuruuteen. Liikkumisen määrää on varioitu nostamalla ja laskemalla päivittäisiä prosenttiosuuksia kymmenellä prosenttiyksiköllä.

Taulukko 11. Liikkuvien autoilijoiden prosenttiosuus mallinnuksessa eri viikonpäivinä. tutkimusaineisto (kerrostalo, n = 4623 kpl, tutkimusaineisto liikkuneet (kerrostalo) n = 3957 kpl, tutkimusaineisto(rivitalo), n = 3006 kpl, tutkimusaineisto liikkuneet (rivitalo) n = 2571 kpl (Liikennevirasto, 2018)

	Ma	Ti	Ke	To	Pe	La	Su
Kerrostalo	89,4	88,6	84,0	88,5	87,2	80,6	80,0
Rivitalo	88,0	87,9	85,0	88,4	88,6	81,8	78,4

Taulukossa 12 on esitetty liikkumistodennäköisyyden vaikutusta latauksen huipputehon muodostumiseen. Muutokset eivät ole aivan suoraa verrannollisia liikkumistodennäköisyyden muutokseen. Kerrostaloesimerkin tapauksessa huipputehojen kasvua tapahtuu suurimmillaan noin 5 %, mutta muutos tasoittuu latausalueen koon kasvaessa. Liikkumismäärän laskiessa myös huipputehon laskee noin 10 %, mutta myös tässä on havaittavissa, että suurempi joukko lataustapahtumia tasoittaa ilmiötä jonkin verran.

Taulukko 12. Päivässä syntyvän ajosuoritteen keskimääräisen todennäköisyyden vaikutus mallinnetun ohjaamattoman latausjärjestelmän huipputuntitehoon tai älykkään latausjärjestelmän tehorajaan kerrostaloissa

Ajosuoritteiden keskimääräinen todennäköisyys päivistä	Huipputuntitehon / Latausjärjestelmän tehorajan muutos, %					
	Kerrostalot, ohjaamaton lataus pysäköintipaikkoja, kpl			Kerrostalot, älykäs lataus pysäköintipaikkoja, kpl		
	10	30	50	10	30	50
Liikkuvuus +10%	5,9	5,7	0,7	5,2	5,1	2,8
Liikkuvuus, alku	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Liikkuvuus -10%	-9,2	-10,0	1,7	-8,4	-9,4	2,1

Taulukossa 13 on esitetty vastaava analyysi rivitalokohteille. Rivitalojen muutokset ovat kerrostalokohdetta suurempia, sillä rivitalojen ajosuoritemäärät ovat kerrostaloja jonkin verran suuremmat. Tämän vuoksi liikkuvuuden muutos näkyy huipputehossa herkemmin. Suurempien ajosuoritepituuksien vuoksi rivitalokohteen tilastollinen käyttäytyminen poikkeaa kerrostalokohteesta. Ajosuoritteiden ollessa pidempiä ei suurempien aluekokonaisuuksien tapauksessa pääse muodostumaan vastaavaa kuormituksen risteilyilmiötä, joka oli havaittavissa kerrostalokohteen tulosaineistossa.

Taulukko 13. Päivässä syntyvän ajosuoritteen keskimääräisen todennäköisyyden vaikutus mallinnetun ohjaamattoman latausjärjestelmän huipputuntitehoon tai älykkään latausjärjestelmän tehorajaan rivitaloissa

Ajosuoritteiden todennäköisyys päivistä	Huipputuntitehon / Latausjärjestelmän tehorajan muutos, %					
	Rivitalot, ohjaamaton lataus pysäköintipaikkoja, kpl			Rivitalot, älykäs lataus pysäköintipaikkoja, kpl		
	10	30	50	10	30	50
Liikkuvuus +10%	8,0	8,8	14,7	8,1	12,9	15,2
Liikkuvuus, alku	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Liikkuvuus -10%	-7,7	-8,8	-6,0	-4,5	-8,6	-6,6

Lähtöparametrien lisäksi analysoitiin huipputehon tilastollista todennäköisyyttä varioimalla tulosten luottamustasoa. Herkkyyksianalyysin lähtötilanteena on käytetty sähkötehon 99 % luottamustasoa. Seuraavissa taulukoissa 14 ja 15 on esitetty eri luottamustasoilla muodostuvasta sähkötehosta syntyvä muutoksen suuruus lähtötilanteeseen.

Taulukko 14. Luottamustason vaikutus mallinnetun ohjaamattoman latausjärjestelmän huipputuntitehoon tai älykkään latausjärjestelmän tehorajaan kerrostaloissa

Luottamustaso	Huipputuntitehon / Latausjärjestelmän tehorajan muutos, %					
	Kerrostalot, ohjaamaton lataus pysäköintipaikkoja, kpl			Kerrostalot, älykäs lataus pysäköintipaikkoja, kpl		
	10	30	50	10	30	50
99 %	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
95 %	-18,1	-16,1	-12,6	-17,3	-14,0	-15,0
90 %	-29,9	-24,9	-19,0	-28,8	-23,7	-18,8

Taulukko 15. Luottamustason vaikutus mallinnetun ohjaamattoman latausjärjestelmän huipputuntitehoon tai älykkään latausjärjestelmän tehorajaan rivitaloissa

Luottamustaso	Huipputuntitehon / Latausjärjestelmän tehorajan muutos, %					
	Rivitalot, ohjaamaton lataus pysäköintipaikkoja, kpl			Rivitalot, älykäs lataus pysäköintipaikkoja, kpl		
	10	30	50	10	30	50
99 %	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
95 %	-16,8	-15,2	-9,4	-14,2	-12,2	-9,6
90 %	-26,5	-22,2	-15,0	-23,2	-21,5	-14,4

Luottamustason valinnan merkitys mitoituksen kannalta on suuri, sillä se kertoo kuinka todennäköisesti mallinnettua tehoa ei ylitetä. Mallinnuksen perusteella voidaan todeta, että älykkäästi ohjatun latausjärjestelmän tapauksessa tehot muuttuvat hieman vähemmän ohjaamattomaan järjestelmään verrattuna. Mallinnuksen kannalta älykkäästi ohjatun järjestelmän huipputehon estimointi perustuu kokonaisenergian muutoksen todennäköisyyteen. Todellisessa järjestelmässä älykkään ratkaisun tehorajan käydessä riittämättömäksi jää osa autojen tarvitsemasta energiasta lataamatta. Mitoituksen kannalta eri luottamustasot kertovat saman viestin molemmissa tapauksissa.

6 Esimerkit ja mitoituksen suunnittelu

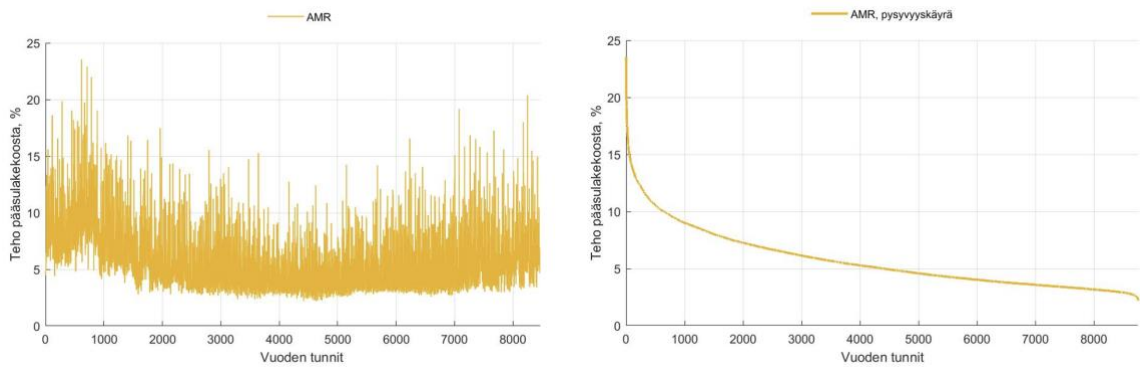
Tässä luvussa esitetään esimerkkejä tutkimuksen mallinnukseen pohjautuen. Esimerkeissä tarkastellaan sekä yksittäisiä kohteita, että isompaan rakennusmassaa kiinteistöjen pääsulakekoon näkökulmasta. Lisäksi esitetään havaintoja lämpötilariippuvuuden huomioinnista suunnittelun yhteydessä.

6.1 Esimerkkitaloyhtiöt

Ensimmäinen esimerkkikohte on kerrostaloyhtiö, joka edustaa 70 -luvulla rakennettua rakennusmassaa. Kohteessa on 30 asuntoa ja 24 autopaikkaa. Kohteen yksityiskohtaisemmat tiedot on listattu alla:

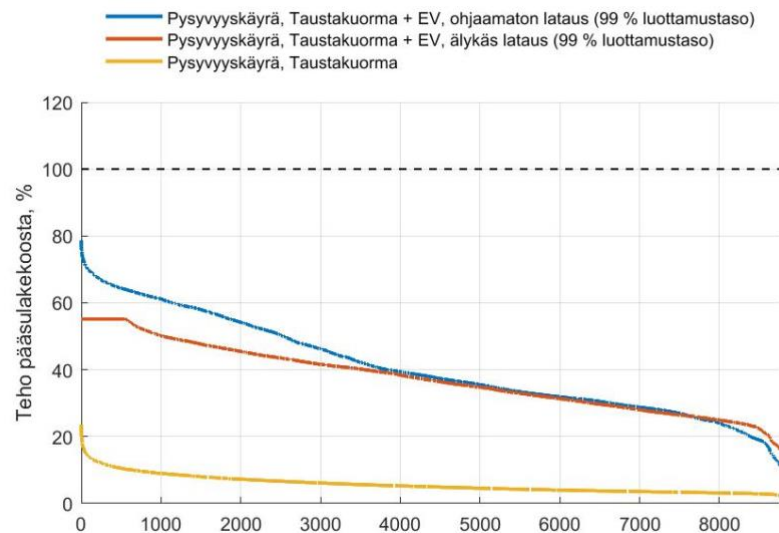
- Kohteessa 30 asuntoa ja 24 autopaikkaa
- Pääsulake 3x200 A (138 kW) (tilanne ennen latausta)
- Päälämmitysmuoto kaukolämpö
- Vuosienergia 69 MWh (kiinteistösähkö ja huoneistosähkö)
- Huipputeho 33 kW (kiinteistösähkö ja huoneistosähkö)
- Huipunkäyttöaika 2 100 h
- Tunnusluvut liikkumisesta:
 - 0,8 autoa per asunto
 - Liikkumismäärä perustuu aiemmin esitettyyn aineistoon
- Tunnusluvut latauksesta:
 - 11 kW/per laturi
 - Esimerkki -20 °C lämpötilassa
 - Ohjaamaton lataus (ladataan kun saavutaan kotiin)
 - Ohjattu lataus (lataustapahtuma siirretään, jotta tavoiteltu tehoraaja ei ylity)

Kohteen mallinnus on tehty samoilla reunaehdoilla kuin raportissa esitetyt muut mallinnustulokset. Kohteen tapauksessa mitoitus on tehty -20 °C ulkolämpötilaa silmällä pitäen. Kohteen pohjakuormitus on tyypillinen kerrostalokohteelle. Keskivuosienergia asuntoa kohden on noin 2,3 MWh/a (kiinteistösähkön osuus jaettu asuntojen kesken). Kulutushuippu muodostuu talviaikaan, kun valaistukselle on paljon kysyntää. Kuormituksessa näkyy vähäisissä määrin autojen esilämmityskuormaa. Pohjakuormituksen profiilia ei ole kuitenkaan manipuloitu esimerkkiä varten. Kuvassa 19 on esitetty kohteen AMR aineiston esimerkkivuoden kiinteistösähkön ja huoneistosähkön yhteenlaskettu tehoprofiili ja pysyvyyskäyrä. Kohteen pohjakuormitus on pysyvyyskäyrästä tulkittuna erittäin huipukasta.



Kuva 19. Esimerkki kerrostalokohteen pohjakuormituksen vuosiprofiili ja pysyvyyskäyrä.

Kuvassa 20 on havainnollistettu huipputehon muutosta, kun kohteeseen lisätään sähköautojen latausta oletuksella, että kaikki henkilöautoliikenne toimii sähköisellä käyttövoimalla, joka pääasiassa ladataan autoon vakituisen asuinpaikan yhteydessä olevalla latauspisteellä. Kyseisessä esimerkissä vapaan tehokapasiteetin osuus on niin merkittävä, että sähköautojen lataus voidaan toteuttaa jopa ilman ohjausta. On hyvä huomata, että tunnin sisällä tapahtuva tehon vaihtelu voi olla merkittävä pienissä kohteissa, joten on järkevää tarkastella tarkemmin mistä kojeista kiinteistön kuormitus muodostuu.



Kuva 20. Esimerkki kerrostalokohteen pohjakuormitus, sekä kuormitus sähköautojen lataamisen lisäämisen jälkeen. Kuvassa on esitetty ohjaamattoman ja älykkäästi ohjatun latausjärjestelmän aiheuttamat lisäkuormitukset 99 % luottamustasolla.

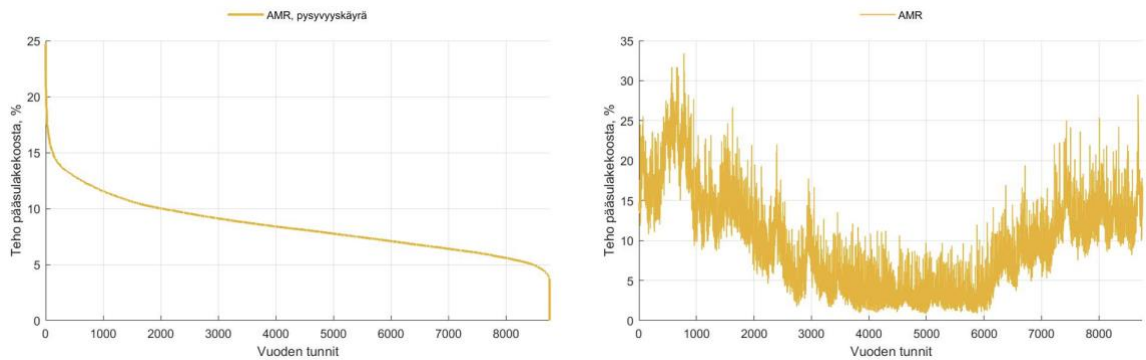
Esimerkissä on laskettu latauskuorma kylmän olosuhteen profiililla koko tarkasteluajalle, joten pysyvyyskäyrä ei täydellisesti kuvasta koko vuoden tilannetta. Pysyvyyskäyrän

huipputunnit esiintyvät kaikki talviaikaan. Kuvaajan tulkinnassa on hyvä myös huomata, että pysyvyyskäyrä edustaa latauksen osalta 99 % luottamustasoa, eli kuvaajasta ei voida tulkita esimerkiksi vuosienergian muutosta. Älykkään latauksen huipputeho on rajoitettu matalimpaan mahdolliseen tehoraajaan. Voidaan todeta, että tehoraja ei muodostu poikkeavan ilmiön vuoksi, sillä tehoraajan rajoittuvia tunteja on noin 600. Huipputehon kasvu älykkäällä latauksella on noin 25 % pienempi verrattuna ohjaamattomaan lataukseen.

Toinen esimerkkikohte on rivitalokohte, jossa on merkittävästi suurempi pohjakuormitus kerrostalokohteeseen verrattuna. Myöskään kohteen vapaa tehokapasiteetti ei ole aivan yhtä suuri. Kohteessa on 15 asuntoa ja 20 autopaikkaa. Kohteen yksityiskohtaisemmat tiedot on listattu alla:

- Kohteessa 15 asuntoa ja 20 autopaikkaa
- Pääsulake 3x160 A (110 kW) (tilanne ennen latausta)
- Vuosienergia 92 MWh (kiinteistösähkö ja huoneistosähkö)
- Huipputuntiteho 37 kW (kiinteistösähkö ja huoneistosähkö)
- Huipunkäyttöaika 2 500 h
- Tunnusluvut liikkumisesta:
 - 1,35 autoa per asunto
 - Liikkumismäärä perustuu aiemmin esitettyyn aineistoon
- Tunnusluvut latauksesta:
 - 11 kW/per laturi
 - Ohjaamaton lataus (ladataan kun saavutaan kotiin)
 - Ohjattu lataus (lataustapahtuma siirretään, jotta tavoiteltu tehoraja ei ylity)
 - Sisältää esilämmityksen

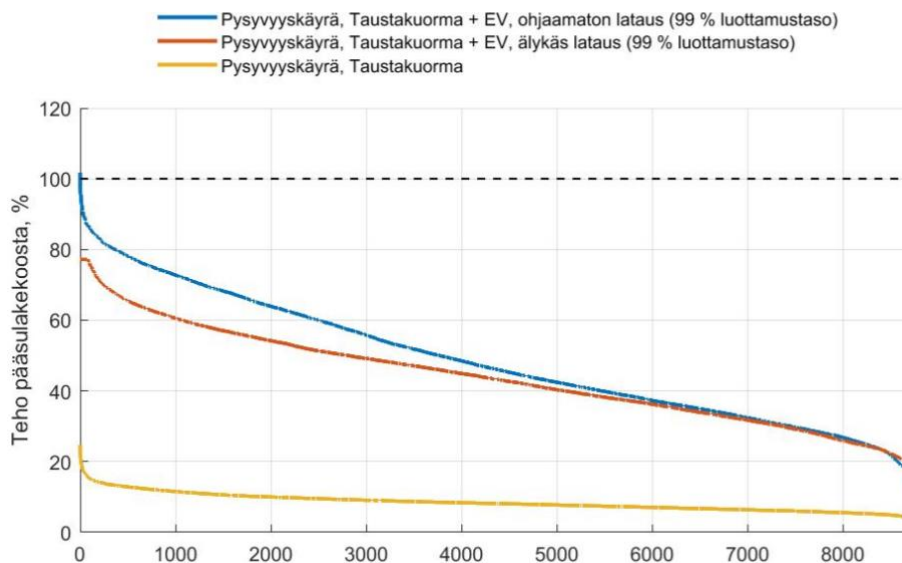
Kohteen mallinnus on tehty samoilla reunaehdoilla kuin raportissa esitetyt muut mallinnustulokset. Kohteen tapauksessa mitoitus on tehty -20 °C ulkolämpötilaa silmällä pitäen. Kohteen pohjakuormitus on tyypillinen rivitalokohteelle. Keski vuosienergia asuntoa kohden on noin 26,1 MWh/a (kiinteistösähkön osuus jaettu asuntojen kesken). Edelliseen esimerkkiin verrattuna talvikauden kulutus on merkittävästi suurempia ja kulutuksessa on havaittavissa talvikauden lämmityskuormaa. Kuvassa 21 on esitetty kohteen AMR aineiston esimerkkivuoden kiinteistösähkön ja huoneistosähkön yhteenlaskettu tehoprofiili ja pysyvyyskäyrä. Kohteen pohjakuormitus on pysyvyyskäyrästä tulkittuna melko huipukasta.



Kuva 21. Esimerkki rivitalokohteen pohjakuormituksen vuosiprofiili ja pysyvyyskäyrä.

Kuvassa 22 on havainnollistettu huipputehon muutosta, kun kohteeseen lisätään sähköautojen latausta oletuksella, että kaikki henkilöautoliikenne toimii sähköisellä käyttövoimalla, joka pääasiassa ladataan autoon vakituisen asuinpaikan yhteydessä olevalla latauspisteellä. Esimerkin vapaa tehokapasiteetti on esimerkissä lähes riittävä, jotta lataus voitaisiin toteuttaa ilman älykästä ohjausratkaisua. Tämän kaltaisen rajatapauksen tilanteessa olisi järkevää tarkastella lähemmin pohjakuormituksen tilastollista luonnetta, sillä pohjakuormitus latauksen kanssa vaikuttaa todella huipukkaalle. Lisäksi on hyvä muistaa, että tuntiteho ei kuvasta kuormituksen nopeiden tehomuutosten luonnetta. On mahdollista, että tunnin sisällä esiintyy vieläkin suurempia huipputehoja.

Myös älykkään ohjausratkaisun tapauksessa vaikuttaa, että ohjauksen tehoraja on muodostettu muutaman vuorokauden pohjakuorman tehohuippujen perusteella. Älykkäiden ratkaisujen avulla voidaan osittain ratkaista tunnin sisällä tapahtuvien nopeiden tehomuutosten haasteita. On kuitenkin hyvä huomata, että sähköautojen vaihtosähkölatauksen tehon sääsäädössä voi olla viiveitä, joten tämä on syytä ottaa huomioon suunnittelussa.



Kuva 22. Esimerkki rivitalokohteen pohjakuormitus, sekä kuormitus sähköautojen lataamisen lisäämisen jälkeen. Kuvassa on esitetty ohjaamattoman ja älykkäästi ohjatun latausjärjestelmän aiheuttamat lisäkuormitukset 99 % luottamustasolla.

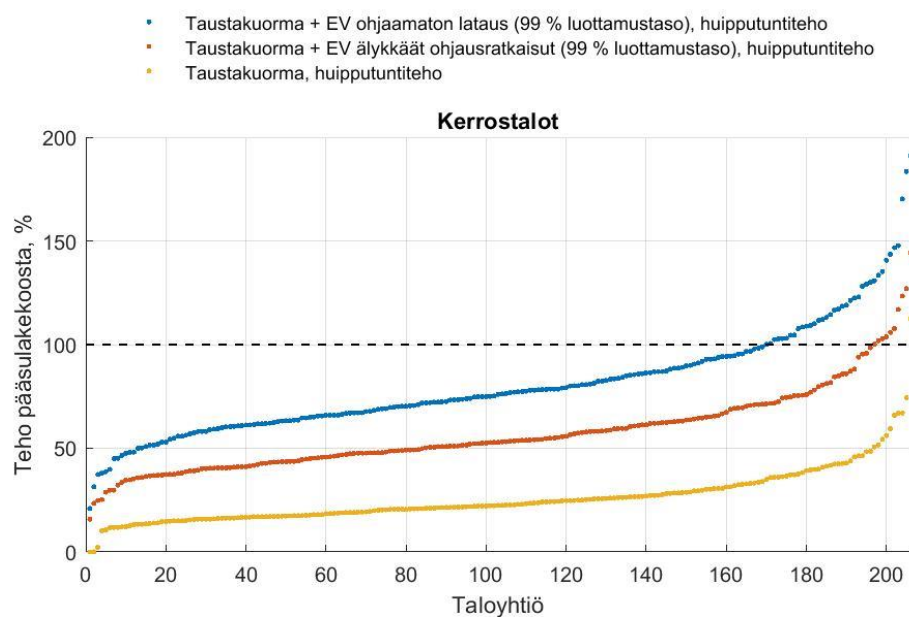
Kuvaajan tulkinnassa pätevät samat lainalaisuudet kuin edellisessä esimerkissä. Latauskuorma on laskettu kylmän olosuhteen profiililla koko tarkasteluajalle koko tarkasteluajalle, joten pysyvyyskäyrä ei täydellisesti kuvasta koko vuoden tilannetta. Pysyvyyskäyrän huipputunnit esiintyvät kaikki talviaikaan. Kuvaajan tulkinnassa on hyvä myös huomata, että pysyvyyskäyrä edustaa latauksen osalta 99 % luottamustasoa, eli kuvaajasta ei voida tulkita esimerkiksi vuosienergian muutosta. Älykkään latauksen huipputeho on rajoitettu matalimpaan mahdolliseen tehoraajaan. Tehoraja on muodostunut kuvaajan perusteella tulkittuna hyvin lyhyen ajan tehohippujen seurauksena, sillä tehoraajaan rajoittuvien tuntien määrä on yhteensä alle 100 tuntia vuodessa. Huipputehon kasvu älykkäällä latauksella on noin 25 % pienempi verrattuna ohjaamattomaan lataukseen.

6.2 Liittymien kapasiteetin riittävyys

Autojen latauksen aikauttamaa kuormitusta voidaan tarkastella myös laajemmassa joukossa liittymämitoituksen kannalta. Oheisissa kuvissa 23 ja 24 on esitetty laskentaesimerkki taloyhtiökohteista, joiden sähköautomäärä on mallinnettu huoneistolukumäärään pohjautuen. Mallinnuksessa on ollut käytössä jokaisen taloyhtiökokonaisuuden sähkönkulutuksen tuntisarjat. Autojen lataus on mallinnettu yhden vuoden mittaisen sarjan perusteella, josta on poimittu huipputeho ennen ja jälkeen sähköautojen latauksen lisäystä.

Kyseiset tarkastelut on tehty oletuksella, että kohteiden kaikki henkilöautoliikenne korvataan ajoneuvoilla, jotka hyödyntävät sähköistä käyttövoimaa ja jotka ladataan pääsääntöisesti taloyhtiön parkkipaikalla. Mallinnusolosuhteena on käytetty $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ lämpötilaa, ajoneuvojen kulutuksen, latauksen ja ensilämmityksen energiasisällön osalta.

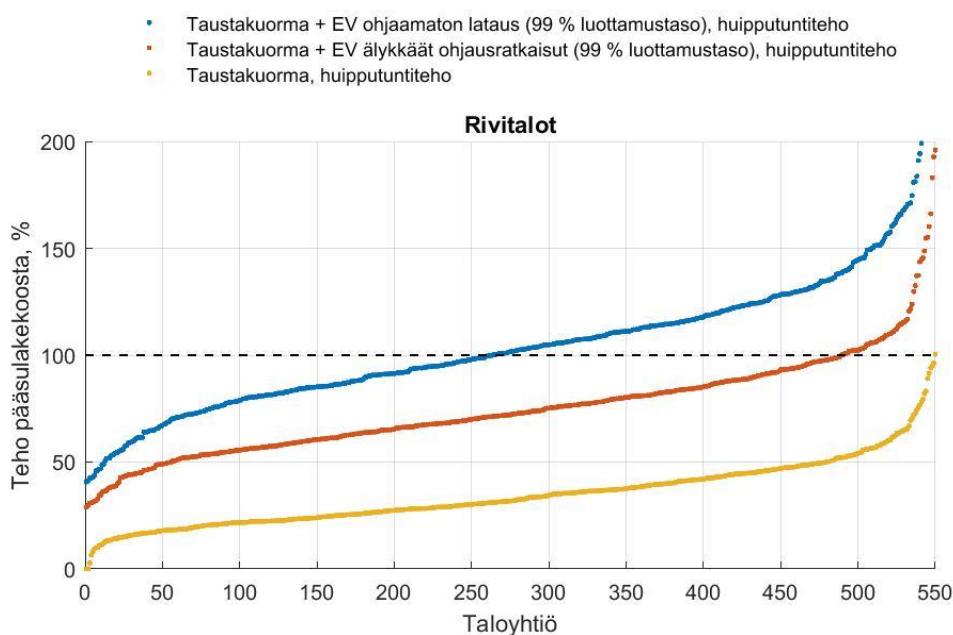
Kuvassa 23 on esitetty kerrostalokohteiden huipputehon muutos sähköautojen latauskuormituksen lisäämisen jälkeen. Lähes kaikissa tarkastelun kohteissa on reilusti vapaata tehokapasiteettia, jota voidaan hyödyntää autojen lataamiseen. Useimmissa tapauksissa kohteen taustakuorman ja latauksen huipputehot osuvat päällekkäin, mutta silti valtaosa kohteista suoriutuu autojen aiheuttamasta lisäkuormituksesta ilman, että liittymäkokoaa tarvitsee suurentaa. Ohjaamattoman latauksen tapauksessa noin 20 % kohteista ylittää liittymäkapasiteetin. Kyseinen otos kerrostaloja on varsin maltillisen kokoinen, eikä tulosta pidä yleistää liikaa.



Kuva 23. Kerrostaloyhtiöiden liittymäkapasiteetti ilman sähköautoja ja sähköautojen latauksen kanssa. Kuvassa on eriteltyä ohjaamattoman ja älykkäästi ohjatun latauksen aiheuttaman huipputehon muutos 99 % luottamustasolla.

Kuvassa 24 on esitetty kerrostalokohteiden huipputehon muutos sähköautojen latauskuormituksen lisäämisen jälkeen. Kohteissa on merkittävästi vapaata tehokapasiteettia, mutta ei huomattavasti vähemmän verrattuna rivitalokohteiden

esimerkkiin. Autojen latauksen mallinnus on tehty samoilla oletuksilla edelliseen esimerkkiin verrattuna. Voidaan havaita, että ohjaamattoman latauksen lisääminen pohjakuormituksen päälle aiheuttaa liittymäkapasiteetin ylityksen yli puolessa tarkastelluista kohteista. Älykkäästi ohjatun latausjärjestelmän tapauksessa noin 10–15 % kohteista ylittää liittymäkapasiteetin.

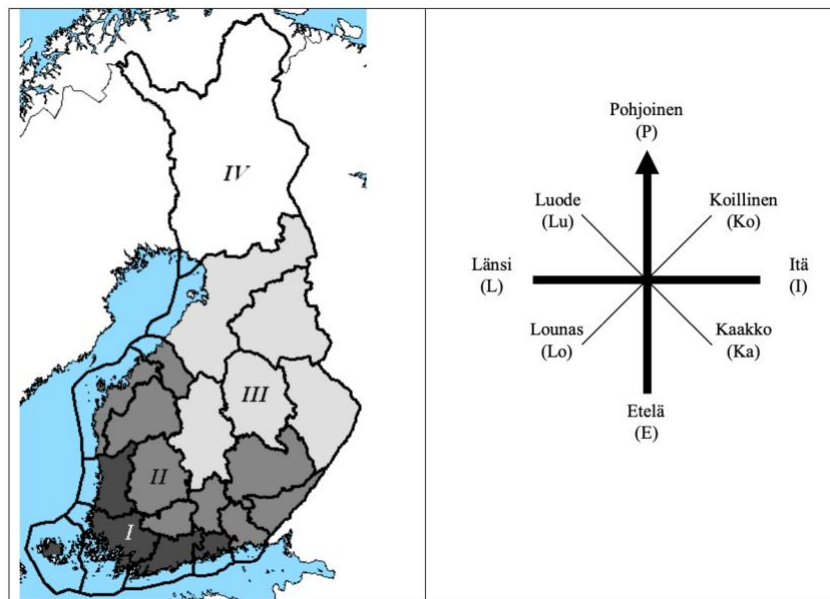


Kuva 24. Rivitaloyhtiöiden liittymäkapasiteetti ilman sähköautoja ja sähköautojen latauksen kanssa. Kuvassa on eriteltyä ohjaamattoman ja älykkäästi ohjatun latauksen aiheuttaman huipputehon muutos 99 % luottamustasolla.

6.3 Lämpötilan huomioiminen mitoituksessa

Sähköautojen latauksen lopulliseen mitoitukseen vaikuttaa usea tekijä. Autojen latauksen keskimääräisen huipputehon luetettava määrittäminen auttaa suunnittelua eteenpäin merkittävässä määrin. Latausalueelle muodostuva huipputeho on monen muuttujan summa, joista ulkolämpötilalla voidaan väittää olevan merkittävin rooli. Tästä syystä suunnittelussa on tarkasteltava alueen maantieteellistä sijaintia sekä mahdollisesti autosuojan rakenteita. Maantieteellisen sijainnin perusteella voidaan arvioida pakkaspäivien määrää ja tarvittaessa keventää mitoitusvaatimusta. Jos latausalue sijaitsee lämmitetyssä tai puolilämpimässä tilassa on latauksen energiasisältö hieman pienempi verrattuna kylmässä tilassa tapahtuvaan lataukseen. Ympäristöolosuhteiden määrittämiseen voidaan esimerkiksi käyttää rakennusmääräyskokoelmassa käytettävää ilmastovyöhykemäärittelyä, joka on esitetty kuvassa 25 (Ympäristöministeriö, 2007). Rakennusmääräyskokoelmassa esitetyt lämpötilat

on tarkoitettu rakennusten lämmityksen mitoittamiseen. Sähköautojen tapauksessa mitoitusta ei välttämättä ole tarkoituksen mukaista tehdä harvinaisen ääriolosuhteen perusteella, jos latausalue on varustettu latauksen ohjausratkaisulla. Käytännössä tässä tilanteessa mitoituksen ylitys johtaa lataustapahtumien jatkumiseen aamulle, jolloin autojen esilämmitys käynnistyy. Kaikkien autojen akkujen varaustaso ei todennäköisesti saavuta täyttä varausta, mutta tämä voi olla hyväksyttävissä oleva ilmiö harvalukuisten kovien pakkaspäivien yhteydessä.



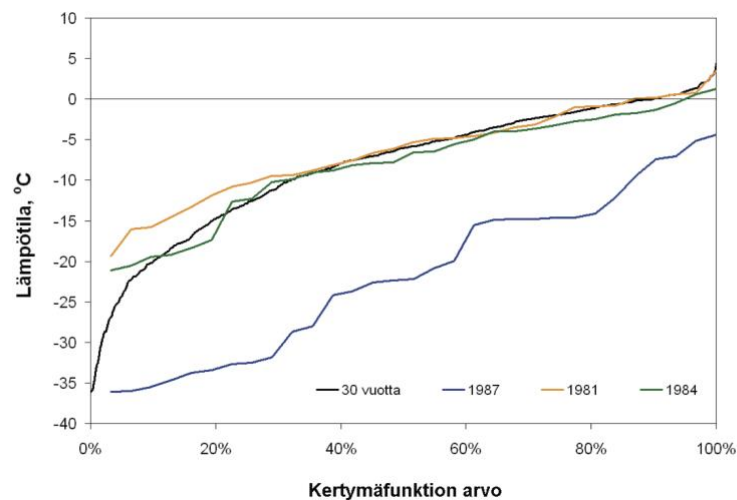
Kuva 25. Rakennusmääräskokoelma D5 sävyöhykkeet (Ympäristöministeriö, 2007).

Taulukossa 16 havainnollistetaan pakkasjaksojen yhtäjaksoista kestoja eri paikkakunnilla. Helsingissä on ollut 58 vuoden aikana 29 yhtäjaksoista alle -15 °C lämpöistä jaksoa (Ilmatieteen laitos, 2021). Pohjoisemmassa pakkasten todennäköisyys ja yhtäjaksoisuus kasvaa merkittävästi.

Taulukko 16. Kovien pakkaspäivien yhtäjaksoinen kesto 1961-2019 (Ilmatieteen laitos, 2021).

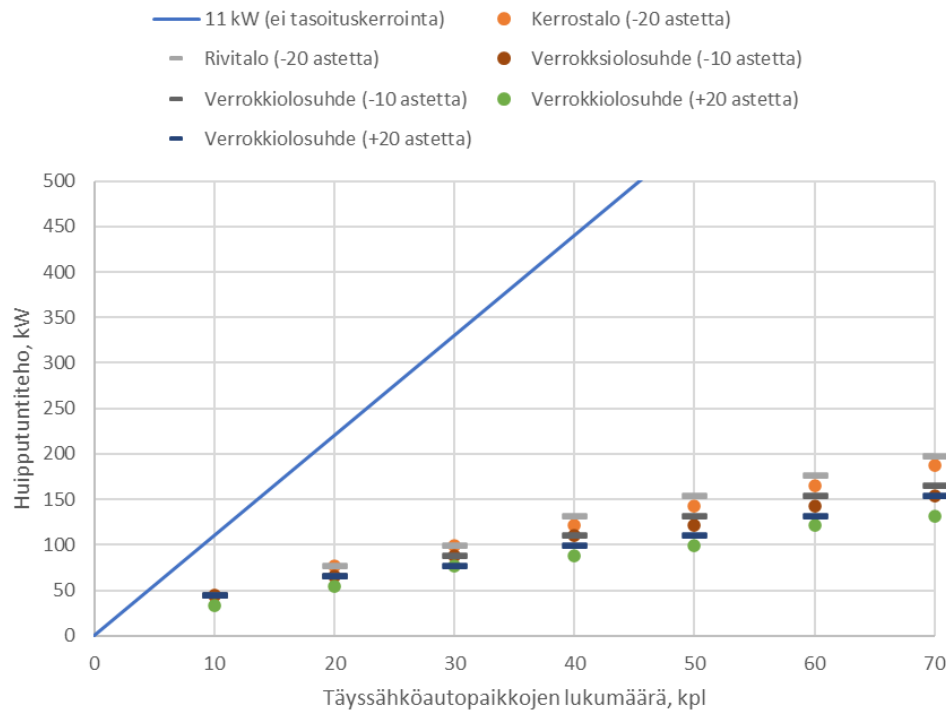
Kovaa pakkasta peräkkäisinä päivinä 1961-2019				
Paikka	Pakkasraja	väh. 7 vrk peräkkäin kpl	väh. 14 vrk peräkkäin kpl	väh. 21 vrk peräkkäin kpl
Helsinki-Vantaa	< -15	29	5	1
Jyväskylä	< -20	27	4	0
Sodankylä	< -25	54	1	1

Pakkaspäivien perättäisyyden lisäksi kylmien päivien absoluuttinen määrä auttaa arvioimaan latauksen mitoittamisen tarvetta ääriolosuhteita varten. Kuvassa 26 on havainnollistettu Jyväskylän keskilämpötilojen jakaumaa kertymäfunktion avulla. Jakauma antaa osviittaa, että vuosien välillä voi olla hyvinkin suurta vaihtelua. Keskiarvotettu kertymäfunktio osoittaa, että kuukauden päivistä vain noin 10 % on sellaisia, että lämpötila laskee alle -20 °C lämpötilan.



Kuva 26. Vuorokauden keskilämpötilojen jakaumia Jyväskylässä tammikuussa 1980–2009. (Jylhä, et al., 2011)

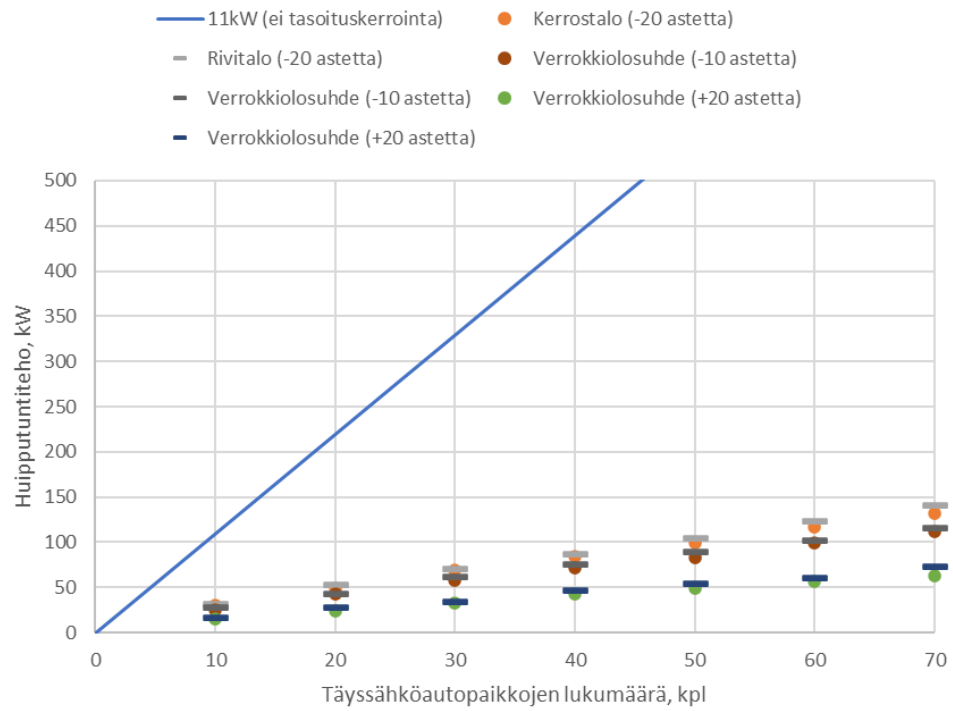
Oheisissa kuvissa 27 ja 28 on esitetty sähköautojen aiheuttaman latauskuormituksen huipputehon muodostumista erikokoisilla latausalueilla. Kuvien tulosjoukoissa on sarja 20 °C, -10 °C ja -20 °C lämpötiloissa. Kun lämpötila laskee pakkasasteille, on kymmenen asteen ero merkittävä huipputehon muodostumisen kannalta. Vaikutukset näkyvät sekä älykkäästi ohjatussa, että ohjaamattomassa latausjärjestelmässä. Älykkäästi ohjatun latausjärjestelmän tapauksessa, mitoitus on mahdollista toteuttaa maltillisempana, sillä järjestelmä jatkaa toimintaa, vaikka energiakapasiteetti ei olisikaan riittävä. Mallinnuksen tuloksena esitetty huipputeho on sellainen tehoraja, joka mahdollistaa autojen akkujen lataamisen täyteen 99 % todennäköisyydellä. Ohjaamattoman järjestelmän tapauksessa järjestelmän huipputeho muodostuu lataustapahtumien yhteenlasketusta tehosta, joka on riippuvainen ulkolämpötilasta. Jos ohjaamattoman järjestelmän tapauksessa alitetaan mitoituslämpötila, on olemassa riski, että latauksen ja muun kuormituksen summa ylittää kiinteistön pääsulakkeen salliman maksimikuormituksen.



Kuva 27. Sähköautojen ohjaamattoman latausjärjestelmän aiheuttama huipputeho kerro- ja rivitalo kohteissa eri lämpötiloissa.

Autojen keskimääräinen latausteho ohjaamattomalla latausjärjestelmällä on pienillä alle 5 auton kohteilla hyvin lähellä ilman tasoituskerrointa olevan laskentatavan mukaista huipputehoa. Autojen keskimääräinen huipputeho laskee voimakkaasti, kun ylitetään 5–10 tarkasteltavan auton määrä. Automäärän kasvaessa tätä suuremmaksi keskimääräisen huipputehon kehitys jatkuu lähes lineaarisena, joten mitoituksen näkökulmasta autojen keskimääräisenä teho useimmissa tilanteissa käyttää vakiota 1,9–3 kW/auto, kun latauspisteitä on yli 10.

Älykkäästi ohjatun latauksen tapauksessa keskimääräinen autokohtainen huipputeho on merkittävästi pienempi, eikä mitoituksessa epäonnistuminen tarkoita automaattisesti suojalaitteen toimintarajan ylittämistä. Kuvasta 28 voidaan tulkita, että keskimääräinen teho vaihtelee välillä 0,9–2 kW/auto kun latauspisteitä on yli 10. Käytännössä mitoitus on tehtävä huomioiden säävyöhykkeet, jotta autojen lataus toteutuu täysimääräisesti valtaosassa tapauksia.



Kuva 28. Sähköautojen älykkäästi ohjatun latausjärjestelmän aiheuttama huipputeho kerro- ja rivitalo kohteissa eri lämpötiloissa.

7 Johtopäätökset ja suositukset

Tutkimusprojektin päätavoitteena oli syventää ymmärrystä, miten latauksen kuormitus muodostuu isommissa kiinteistökokonaisuuksissa. Keskeisenä tutkimuskysymyksenä oli, mikä on sähköautojen latausprofiili ja miten olosuhteet vaikuttavat latausprofiilin muodostumiseen. Lisäksi tarkasteltiin miten muuttuvat olosuhteet vaikuttavat lataustapahtumien kerrostumiseen. Tarkastelun pääpaino oli kylmien olosuhteiden vaikutusten analysoinnissa, sillä kylmien olosuhteiden vaikutus akkujen lataukseen on tunnistettu useissa tutkimuksissa. Lisäksi useat tahot ovat raportoineet autojen ajon aikaisen kulutuksen olevan merkittävästi suurempi kylmissä olosuhteissa. Tutkimuksen päähuomiona voidaan todeta, että kylmät olosuhteet vaikuttavat sähköautojen keskimääräiseen mitoitustehoon merkittävässä määrin. Kylmien olosuhteiden mitoitustehon muutoksen aiheuttavat ajoneuvojen käytön aikaisen energiamäärän kasvusta, sekä latauksen ja esilämmityksen energiasisältöjen muutoksesta. Lataustapahtuman energiasisällön muutos aiheuttaa lataustapahtumien pidentymistä, joka johtaa luonnollisen tehon risteilyn pienentymiseen ja latausalueen huipputehoin kasvuun. Yksittäisen ajoneuvon huipputehon on riippuvainen ajoneuvon laturista ja latauspisteen nimellistehosta. Latausalueen mitoituksen kannalta merkittävin tekijä on autojen latauksen huipputehon muodostuminen. Ladattavien ajoneuvojen latauksen kokonaisenergisäily on myös merkittävä tekijä, jonka merkitys korostuu erityisesti älykkäästi ohjatun lataus ratkaisun mitoituksen muodostamisessa. Tutkimuksen tuloksena muodostettiin simulointimalli, jolla voidaan estimoida ulkolämpötilan vaikutus ohjaamattoman ja älykkäästi ohjatun latausratkaisun huipputehon muodostumiseen.

Tutkimuksen tavoitteena oli lisäksi tarkastella miten latauskuormitus vaikuttaa kiinteistöjen liittymien mitoitusvaateisiin ja millaisia saneerausvaatimuksia autojen yleistymisen luo kiinteistöjen omistajille. Aihetta tarkasteltiin otoksella AMR -tuntisarjoja kerrostalo- ja rivitalokohteista. Tarkastelussa kävi ilmi, että kiinteistöillä on hyvät valmiudet lisätä sähköautojen latauskuormaa olemassa olevien liittymäkapasiteettien puitteissa. Havaittiin myös, että älykkäiden tehoa rajoittavien latausratkaisujen rooli on merkittävä huipputehon muodostumisen näkökulmasta. Kiinteistöjen sähköjärjestelmien saneeraustarpeen arviointi havaittiin haasteelliseksi, sillä eri aikakausilla rakennettujen kiinteistöjen sähköjärjestelmien toteutus on ollut useiden tekijöiden summa. Sähköjärjestelmien saneerausta koskien on hyvin vaikea lausua yleisluontoisia suosituksia. Voidaan todeta, että vanhemmilla

kiinteistöillä voi olla tarve saneerata sähköjärjestelmä, vaikka yhtiöön ei olisi vielä suunnitteilla sähköautojen latausalueita. Mahdollisen saneerauksen yhteydessä on järkevää suunnitella valmius sähköautojen lataukselle, lisäksi laki velvoittaa tähän.

Tutkimuksen keskeisenä kysymyksenä oli myös älykkäiden latausratkaisujen vaikutusten arviointi mitoitusasteeseen. Tutkimus tarkasteli älykästä latausratkaisua, jolla pyritään rajoittamaan latausalueen tai kiinteistön huipputeho tietyille tasolle. Kyseinen ratkaisu alentaa merkittävästi kiinteistön huipputehon kasvua sähköautojen latauksen tapauksessa. Tutkimuksen perusteella voidaan esittää, että kyseisen tyyppistä ohjausratkaisua on järkevää hyödyntää lähes kaikissa kohteissa. Älykkäällä latauksen ohjausratkaisulla voi olla mahdollista välttää sähköjärjestelmän saneeraus tai liittymäkapasiteetin kasvattaminen.

Keskeisten tutkimuskysymysten analyysin tueksi tehtiin laaja herkkyysanalyysi, jossa varioitiin latauskuormituksen muodostumiseen vaikuttavia muuttujia. Herkkyysanalyysiin pohjautuen voidaan sanoa, että lataustapahtuman keskimääräisen energiasisällön muodostumiseen vaikuttavat muuttujat ovat keskiössä kun estimoidaan latauksen aiheuttamaa huipputehoa. Energiasisällön lisäksi tehon muodostumiseen vaikuttaa oleellisesti latauksessa käytettävien laturien nimellisteho tai tehoraja. Jos laturien tehoa lasketaan merkittävästi alle 11 kW rajaan voidaan saavuttaa matalampi huipputeho ohjaamattoman latauksen tapauksessa. Samalla kun laturien tehoa rajoitetaan, vaikutetaan myös latauksen dynaamisuuteen negatiivisesti. Tosin sanoen latausalueen palvelutaso kärsii, kun latauksen kesto pidentyy. Samalla latausalueen mahdollisuus vastata tilastollisesti harvalukuisiin ilmiöihin heikkenee.

7.1 Suositukset

Tutkimuksen perusteella voidaan määritellä joukko suosituksia, jotka koskevat niin taloyhtiöt, jakeluverkkoyhtiöitä kuin suunnitellusta vastaavia tahoja ja latausratkaisujen toteuttajia.

7.1.1 Lämpötilan huomiointi

Tutkimuksen mallinnuksen perusteella voidaan sanoa, että suunnittelussa on hyvä ottaa huomioon säävyöhykkeet, vastaavasti kuten esimerkiksi rakennusten eristyksen ja lämmitysjärjestelmien suunnittelussa on käytäntö. Tähän voidaan hyödyntää esimerkiksi rakennusmääräyskokoelmassa esitettyä säävyöhykemallia. Rakentamisen kannalta alimmat

lämpötilat on määritetty erittäin korkealla luottamustasolla, joka ei välttämättä ole järkevää latausjärjestelmää suunniteltaessa. Jos latausjärjestelmät suunnitellaan lähtökohtaisesti hyödyntäen älykkäitä ohjausratkaisuja, joiden avulla on mahdollista lukiata järjestelmän huipputeho, voidaan mitoituksen varmuuskertoimia tarkastella kriittisemmin. Vaikka kyseisen järjestelmän mitoitus ei pysty vastaamaan täysimittaisesti alimpien mahdollisten lämpötilojen kysyntää, jatkaa järjestelmä silti toimintaa.

7.1.2 Älykkäät latausratkaisut ja latureiden teho

Latauksen älykkäiden ratkaisujen rooli on erityisen tärkeä huipputehon hallinnan näkökulmasta. Tässä tutkimuksessa älykäs latausjärjestelmä viittaa järjestelmään, joka pystyy ajoittamaan lataustapahtumat siten, että alueelle määritelty yhteenlaskettu huipputeho ei ylitä. Järjestelmä voi olla rakennettu huomioimaan kiinteistön ja latausalueen yhteenlasketun kuorman tai pelkästään latausalueen kuorman. Älykkäiden latausratkaisujen avulla on mahdollista saavuttaa merkittäviä huipputeholeikkauksia ohjaamattomiin järjestelmiin verrattuna.

Latauspistekohtaisen lataustehon on syytä olla riittävä, kuten esimerkiksi nykyisten suositusten mukainen 11 kW. Riittävä laturin nimellisteho varmistaa, että latausalueen palvelutaso säilyy riittävän dynaamisena käyttäjän näkökulmasta. Käytännössä isommalla teholla on mahdollista lyhentää keskimääräistä latausaikaa ja vastata paremmin tilastollisesti harvalukuisten ilmiöiden vaatimaan kysyntään. Ohjaamattomien latausalueiden tapauksessa laturien nimellistehon alentaminen laskee järjestelmän huipputehoa, mutta huipputeho on silti suurempi kuin se olisi vastaavalla älykkäästi ohjatulla järjestelmällä. Lisäksi on hyvä huomioida, että mallinnuksen tulokset on esitetty tuntikeskitehoina. Käytännössä tunnin sisällä voi esiintyä tätäkin suurempia lyhytaikaisia huipputehoja.

7.1.3 Suunnitteluun liittyvä tausta-aineisto

Tehokkaan suunnittelun kannalta on suotavaa, että suunnittelijoilla olisi käytettävissä suunnitellun kohteen olevan kiinteistön AMR -tuntisarjat kiinteistösähkön ja huoneistosähkön osalta sähköjärjestelmän yksityiskohtien ja rakennuksen muiden tietojen ohella. Sähkönkulutuksen tuntisarjojen avulla on mahdollista estimoida hyvin tarkasti, miten valittu mitoitus tulee toimimaan kyseisessä kohteessa. Lisäksi on hyvä huomioida, että kohteen pohjakuormitus ei ole staattinen taustamuuttuja, vaan se voi elää ja muuttua ajansaatossa kiinteistöön tehtävien energiasaneerausten yhteydessä. Siksi on hyvä tarkastella

kohteen historiaa ja taloyhtiöiden tapauksessa myös kohteiden saneeraussuunnitelmia ja niiden ajantasaisuutta

7.1.4 Oma liittymä

Tietyissä kohteissa on hyvä tarkastella myös, onko kiinteistön liittymän laajentamien järkevää. Liittymän uudelleenmitoitus voi johtaa koko pääkeskuksen saneeraukseen, joten voi olla mielekästä tarkastella myös vaihtoehtoa, jossa kiinteistön latausalueelle tilataan uusi oma liittymä. Latausalueen liittymän suunnittelu on asiantuntevan insinööritoimiston tehtävä. Suunnittelussa puntaroidaan kohteen näkökulmasta teknistaloudellisesti järkevimät ratkaisut. Kohteet ovat uniikkeja, joten latausalueen oman liittymän hankinnasta ei voida lausua tarkempaa ohjeistusta, mutta uuden liittymän hankinta tietyissä kohteissa on varteenotettava vaihtoehto.

7.1.5 Aiheeseen liittyvät ohjeistukset

Tämän raportin päätelmät kuvastavat näkemystä tutkimuksen suorituksen ajan näkökulmasta. Suunnittelussa on hyvä tukeutua ajantasaiseen informaatioon, jota useista lähteistä. Sesko Ry päivittää ja ylläpitää sähköautojen lataussuosituksia (Sesko Ry, 2021). Suositus tiivistää yhteen sähköautojen latausta koskevaa standardointia ja antaa suuntaviivoja menettelyyn. Lisäksi Sähköinfo (Sähköinfo Oy, 2021) myy Sähkötiedon ylläpitämiä ST-kortteja (Sähkötieto, 2021) ja ST-käsikirjoja (Sähkötieto, 2021), joissa on ajantasaista tietoa suunnittelun tueksi. Sähköautojen latausta käsitellään ST-kortissa ST ”13.31. Rakennuksen sähköverkon ja pienjänniteliittymän mitoittaminen” ja ” ST 51.90. Sähköautojen lataaminen ja latauspisteiden toteutus”, sekä ST-käsikirjassa ” ST-käsikirja 41 Sähköautot ja latausjärjestelmät”. Lisäksi etujärjestöt tuottavat paljon aiheeseen liittyvää uutisointia ja tiedotteita.

7.2 Jatkotutkimus

Tutkimus keskittyi sähköautojen lataamiseen ja latauskuormituksen muodostumiseen isommissa kiinteistöissä, kuten kerrostalo- ja rivitaloyhtiössä. Suurin ja merkittävin osa latauksesta tapahtuu vakituisten asuinpaikan latausalueella, mutta autojen latausta tapahtuu myös muissa kohteissa. Muiden kohteiden latausprofiilit ja energiakertymät ovat riippuvaisia kunkin kohteen erityispiirteistä. Tämä tutkimus ei ota kantaa vakituisten asuinpaikan ulkopuolella tapahtuvaan lataukseen.

Tutkimuksen tulokset ovat tietyin varauksin sovellettavissa omakotitaloalueen kaltaisiin kokonaisuuksia, mutta eivät loma-asutuksen näkökulmasta. Tutkimus nojautui hyvin vahvasti keskimääräistä käyttäytymistä kuvaaviin tilastoihin, jotka eivät kuvaa lomaliikennettä tai loma-asutuksen kokemaan latausenergiakysynnän muodostamaan kuormitusta. Erityinen huoli kohdistuu pohjoisessa sijaitseviin lomakohteisiin ja kohteiden erityyppisiin majoitus kiinteistöihin. Pohjoissuomen kohteiden talvilämpötilat ovat suurella todennäköisyydellä merkittävästi eteläsuomen lämpötiloja alahaisemmat, lisäksi on todennäköistä, että kuormitushuippu muodostuu hyvin lyhyelle ajanjaksolle.

Lisäksi tutkimusten aineistoja läpikäydessä havaittiin, että osa autojen kolmivaiheisista latureista vuorottelee kuormitusta vaiheiden välillä nopeilla tehomuutoksilla. Tutkimuksen puitteissa ei paneuduttu epäsymmetriasta mahdollisesti muodostuviin haasteisiin. Nyiset ohjeistukset suosittavat vaiheistuksen kierrättämistä latausalueita rakennettaessa, joka vastaa hyvin yksivaiheisten laturien muodostamaan epäsymmetriaan. On syytä tarkastella laturien vaiheiden vuorotteluun liittyviä käytäntöjä, jotta tästä ei muodostu ongelmaa sähköisen liikenteen laajamittaisen yleistymisen myötä.

Lähdeluettelo

Traficom, 2021. *Tilastotietokanta*. [Online]

Saatavilla: <https://trafi2.stat.fi/>

Traficom, 2021. *Liikennefakta*. [Online]

Saatavilla: <https://liikennefakta.fi/fi/ymparisto/henkiloautot/liikennekaytossa-olevat-henkiloautot-kayttovoimittain>

[Haettu 08 2021].

Sähköinen liikenne ry, 2021. *Sähköinen liikenne -tilannekatsaus 2021 Q2*. [Online]

Saatavilla: <https://emobility.teknologiateollisuus.fi/sites/emobility/files/inline-files/2021%20Q2%20Sähköinen%20liikenne%20tilannekatsaus%202021%2008%2030%20jaettava.pdf>

Liikenne- ja viestintäministeriö, 2021. *Fossiilittoman liikenteen tiekartta : Valtioneuvoston periaatepäätös kotimaan liikenteen kasvihuonepäästöjen vähentämisestä*, Helsinki: Liikenne- ja viestintäministeriö.

Tikka, V., Lassila, J., Haakana, J. & Partanen, J., 2011. *Case study of the effects of electric vehicle charging on grid loads in an urban area*. Manchester, UK, IEEE.

Rautiainen, A. ym., 2012. Statistical Charging Load Modeling of PHEVs in Electricity Distribution Networks Using National Travel Survey Data. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 3(4), pp. 1650-1659.

Kalenius, J., 2021. *Sähköautojen lataustehon muodostuminen kiinteistöverkoissa ja pysäköintialueilla*. Lappeentanta: LUT-yliopisto.

Tilastokeskus, 2021. *Kasvihuonekaasut*. [Online]

Saatavilla: <https://www.stat.fi/til/khki/>

[Haettu 31 9 2021].

Tikka, V., Lassila, J. & Laine, T., 2021. *Technical report: Measurements of cold climate EV charging*, Lappeenranta: LUT University.

Tekniikan Maailma (TM), 2019. *Tekniikan Maailma (TM)*, Osa/vuosikerta 5/2019.

Tekniikan Maailma (TM), 2021. Osa/vuosikerta 5/2021.

Norwegian Automobile Federation (NAF), 2021. *Rekkeviddetest vinter 2021*. [Online]

Saatavilla: <https://nye.naf.no/elbil/bruke-elbil/test-rekkevidde-vinter-2021>

EUR-Lex, 2018. *Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi (EU) 2018/844*. [Online]

Saatavilla: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/ALL/?uri=CELEX%3A32018L0844>

Liikennevirasto, 2018. *Henkilöliikennetutkimus 2016*. [Online]

Saatavilla: https://julkaisut.vayla.fi/pdf8/lti_2018-01_henkiloliikennetutkimus_2016_web.pdf

Liikennevirasto, 2010. *Henkilöliikennetutkimusten julkaisut*. [Online]

Saatavilla:

<https://www.traficom.fi/fi/ajankohtaista/julkaisut/henkiloliikennetutkimusten-julkaisut?toggle=Henkilöliikennetutkimus%202010-2011>

Autoalan Tiedostuskeskus, 2020. *Ladattavien autojen käyttäjätutkimus – selvitys ladattavien hybridien ja täyssähköautojen käyttötavoista*, Helsinki: s.n.

Electric Power Research Institute (EPRI), 2018. *Electric Vehicle Driving, Charging, and Load Shape Analysis: A Deep Dive Into Where, When, and How Much Salt River Project (SRP) Electric Vehicle Customers Charge*, Palo Alto, CA: s.n.

Ympäristöministeriö, 2007. *Rakennuksen energiankulutuksen ja lämmitystehontarpeen laskenta*, Helsinki: Ympäristöministeriö.

Ilmatieteen laitos, 2021. *Kovat pakkaset ja talven kylmimmät*. [Online]

Saatavilla: <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/kovat-pakkaset-ja-kylmimmat-talvet>

Jylhä, K. ym., 2011. *Rakennusten energialaskennan testivuosi 2012 ja arviot ilmastomuutoksen vaikutuksista*, Helsinki: Ilmatieteen laitos.

Sesko Ry, 2021. *Sähköajoneuvojen lataussuositus 2021*. [Online]

Saatavilla:

https://www.sesko.fi/standardit/standardoinnin_aihealueita/sahkoautot_ja_lataus_jarjestelmat/lataussuositus

Sähkötieto, 2021. *ST-kortit*. [Online]

Saatavilla: <http://www.sahkotieto.fi/index.php?k=14974>

Sähkötieto, 2021. *ST-käsikirjat*. [Online]

Saatavilla: <http://www.sahkotieto.fi/index.php?k=14975>

Sahkoinfo Oy, 2021. *Sähköinfo*. [Online]

Saatavilla: <https://www.sahkoinfo.fi>

Autoalan Tiedostuskeskus, 2021. *Henkilöautojen ensirekisteröinnit segmenteittäin*.

[Online]

Saatavilla: https://www.aut.fi/tilastot/ensirekisteroinnit/ensirekisteroinnit_segmenteittain

ISBN 978-952-335-716-7

ISBN 978-952-335-716-7 (PDF)

ISSN-L 2243-3376

ISSN 2243-3376

Lappeenranta 2021

 LUT
University