

Juho Polvinen

SÄHKÖISTEN AJONEUVOJEN LATAUSJÄRJESTELMÄT SÄHKÖVERKON NÄKÖKULMASTA

Kandidaatin työ
Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta
Tarkastaja: Pertti Järventausta
Joulukuu 2021

TIIVISTELMÄ

Juho Polvinen: Sähköisten ajoneuvojen latausjärjestelmät sähköverkon näkökulmasta
Kandidaatin työ
Tampereen yliopisto
Sähkötekniikan tutkinto-ohjelma
Joulukuu 2021

Perinteisten polttomoottorikäyttöisten ajoneuvojen päästöjen ympäristövaikutukset huolestuttavat kaikkia. Tämä on johtanut siihen, että ihmiskunta on joutunut etsimään vaihtoehtoisia ratkaisuja liikenteelle. Yksi ratkaisuihin on sähköistetty liikenne. Tekniikalla on kuitenkin negatiivisia ja positiivisia vaikutuksia sähköverkon kannalta. Vaikutusten ymmärtäminen on tärkeää, jotta sähköistetyn liikenteen ja sähköverkkojen yhteistyö tulee toimimaan sujuvasti niin nykypäivä kuin tulevaisuudessakin.

Työn tutkimus keskittyy latausratkaisujen latausenergian tarpeeseen ja latausratkaisuiden vaikutukseen sähköverkon sähkön laadun kannalta. Nämä toimivat realistisina mittareina tulevien ongelmien arviointiin, vaikka latauksen vaikutukset eivät olekaan yksinkertaisia. Tutkimusaineistona toimii pääosin tieteellisistä tietokannoista noudettu kirjallisuus ja eri yritysten tuote-esittelysivustot. Lisäksi tutkimusta varten on haastateltu Suomen kantaverkkoyhtiötä Fingridiä.

Energiantarpeen tutkimiseksi työssä tarkastellaan sekä sähköistettyjen kulkuneuvojen latausratkaisuihin kohdistuvia ulkoisia vaikutteita sekä arviota Suomen sähköautojen kirjosta vuoteen 2030 mennessä. Suomen tulevaa sähköautojen kirjoa arvioidaan työssä henkilöautojen, sähköbussien ja sähköistettyjen kuorma-autojen osalta. Ajoneuvojen määrä perustuu Suomen liikenne ja viestintä ministerien tavoitteeseen Suomen sähköautotavoitteesta. Latausverkostojen kapasiteettia kuvataan hyödyntämällä Kotkan alueen sähköautojen latauskarttaa.

Tämän lisäksi työssä tutkitaan sähköautojen latausverkostoa ja älykästä latausta. Älykäs lataus sisältää lupaavan, mutta vielä alkuvaiheessa olevan teknologian, joka mahdollistaa sähköverkkoyhtiölle lataustavan ja tekniikan hallinnan. Tekniikka on olennainen osa sähköverkkoa, koska se antaa sähköverkkoyhtiöille voimakkaan työkalun sähköistetyn liikenteen ongelmien ratkaisemiseen ja lisäksi tekniikka toimii askeleena kohti joustavampaa sähköverkkoa.

Latausverkoston infrastruktuurin tarkastelu sisältää latausverkostokomponenttien eli latauspisteiden ja muuntajien esittelyn ja erilaisten parkkialueiden latausinfrastruktuurin. Työn alussa tutustutaan myös sähköautojen ja lataustekniikan perusteisiin sekä sähköauton akustoon akkuteknologian näkökulmasta.

Avainsanat: V2G, sähköinen liikenne, sähköauto, latausenergian vaikutukset, älylataus, lataustekniikka

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

ALKUSANAT

Tämä kandidaatintyö on tehty Tampereen yliopiston sähkötekniikan tutkinto-ohjelmaa varten. Kiitän tarkastajaani ja ohjaajaani Pertti Järventaustaa hänen opastuksestaan. Kiitän myös läheisiäni tuesta.

Tampereella, 5.12.2021

Juho Polvinen

SISÄLLYSLUETTELO

1 Johdanto	6
2 Tekniikka.....	7
2.1 Sähköautojen lataustavat.....	7
2.2 Latauspistokkeet.....	8
2.3 Yleistä sähköautoista	11
2.4 Akusto.....	12
3 Standardit ja direktiivit	14
3.1 EU.....	14
3.2 Suomi.....	15
4 Latausenergian tarpeet eri käyttökohteissa	17
4.1 Henkilöautot.....	18
4.2 Julkinen liikenne.....	21
4.3 Raskas liikenne.....	22
5 Latausverkon rakenne.....	24
5.1 Latausverkoston komponentit	24
5.2 Muuntajat	25
5.3 Latausenergian mittaus	25
5.4 Älylataus	26
5.5 V2G.....	27
6 Energiantarpeen vaikutukset.....	28
6.1 Sähkön tuotanto ja sähkömarkkinat	28
6.2 Sähköverkko	29
6.3 Yritykset ja asuminen	34
7. Yhteenveto.....	36
LÄHTEET.....	37

LYHENTEET JA MERKINNÄT

a	Pinta-ala
α	Pinnan lämmönsiirtokerroin
A	Ampeeri
AC	Vaihtovirta
DC	Tasavirta
CCS	Combined charging system
CHAdEMO	CHArge de MOve
EV	Electric vehicle
EU	European union
HEV	Hybrid electric vehicle
I	Virta
IEC	International Electrotechnical Commission
P	Järjestelmän pätöteho
PHEV	Plug-in hybrid electric vehicle
R	Kappaleen resistanssi
SFS	Suomen standardoimisliitto
t	Ajanjakson pituus
T	Lämpenemä
U	Jännite
V	Voltti
V2G	Vehicle to grid, sähköauton kommunikaatio sähköverkon kanssa
V2V	Vehicle to vehicle, kahden sähköauton välinen kommunikaatio
ΔA	Sähköenergian häviöt

1 Johdanto

Tiedonhalun tarve ja suosio uusiutuvien energialähteiden ja ekologisten energiaratkaisujen ympärillä on ollut viime vuosina kasvussa, johtuen ilmastonmuutoksesta ja nousevasta ympäristön suojelun tarpeesta. Yksi esimerkki ekologisesta ratkaisusta on sähkön käyttö liikenteessä. Sähköistetyt ajoneuvot tuovat kuitenkin uusia mahdollisuuksia ja ongelmia niin paikallisille, kuin valtakunnallisillekin sähköverkoille. Tässä kandidaatintyössä tarkastellaan mitä nämä ongelmat ovat, miten ne vaikuttavat ja mitä ratkaisuja on olemassa, jotta kyseisiä esteitä voidaan ratkaista. Tarkastelutaso muodostuu kerrostalojen pihoista aivan valtakunnallisiin sähköverkoihin asti.

Sähköistettyjen kulkuneuvojen latausverkot ovat vielä Suomessa suhteellisen suppeita, mutta muissa pohjoismaissa tilanne on jo parempi [1, s 1], latausverkostojen tilanne paranee kuitenkin vuosi vuodelta. Lisäksi eri yritykset tuovat uusia ja erilaisia sähköistettyjä kulkuneuvoja markkinoille, suunnaten niitä eri kohderyhmille, ja eri tarkoituksiin, lisäten täten sähköistetyille liikenteelle uusia mahdollisuuksia. Ottaen huomioon EU direktiivien, sekä Suomen hallituksen yritykset lisätä sähköautojen ja sähköistettyjen kulkuneuvojen määrää, lienee turvallista sanoa, että latausverkostojen kasvu on taattu.

Sähköistettyjen ajoneuvojen historia voidaan sanoa alkaneeksi vuonna 1828, kun unkarilainen keksijä Ányos Jedlik yhdisti pienen sähkömoottorin hänen rakentamaansa sähköiseen malliautoon [2]. Seuraavina vuosikymmeninä useat keksijät suunnittelivat ensimmäisiä sähköautojen malliratkaisuja [2]. Noin sadan vuoden päästä, 1900-luvun alkupuolella bensiinikäyttöisten autojen suosio [3] nousi kuitenkin sähköautojen yläpuolelle ja täten sähköistettyjen ajoneuvojen suosio hiipui. 60-luvulla ymmärrys haitallisten päästöjen vaikutuksista kuitenkin lisääntyi ja vaihtoehtoisten polttoaineiden etsintä alkoi [2]. Tänä päivänä monet ihmiset ja organisaatiot, kuten Euroopan Unioni näkevät, että päästötömät ratkaisut ovat tulevaisuudessa järkevämpiä sekä ympäristön että ihmisten kannalta [4].

Työn tarkastelu keskittyy nimenomaan sähköistettyjen kulkuneuvojen lataamisen ja energiantarpeen luomiin ongelmiin sähköverkostoissa. Täten työssä käsitellään ladattavia ajoneuvo ratkaisuja, ja esimerkiksi perinteiset hybridit pääosin sivuutetaan, koska niiden akusto ladataan autossa olevan generaattorin, ei ulkoisen sähköverkon kautta. Työn alussa tarkastellaan teknisten ominaisuuksien ja direktiivien tuomia kannustimia, jonka jälkeen siirrytään kulkuneuvojen energiantarpeen myötä suoraan sähköverkkojen ongelmiin. Tarkastelukohteita ovat ennustettavissa oleva ajoneuvomäärä ja sen latausteho, sekä kulutuspiikkien ja energiantarpeen vaikutukset. Oleellista on myös tarkastella latauspisteiden vaikutusta sähkölaatuun. Työssä tarkastellaan ilmiötä eri sähköverkon osien kannalta, sekä pidetään mielessä verkon muutosten kustannukset. On järkevää tarkastella sekä infrastruktuurin muutosta, että muita ulkoisia vaikutuksia, esimerkiksi eduskunnan päätöksiä taloudellisia vaikutuksia. Nämä eivät ole kuitenkaan teoksen keskiössä.

Toinen tarkasteltava asia on, miten sähköautojen käyttö sähkön väliaikaisena varastona voisi lisätä verkon joustavuutta ja kenties tuottaa uusille energianlähteille uusia mahdollisuuksia. Tämä V2G on toiminnallisuus, mikä sisältää omat haasteensa, mutta myös mahdollisuutensa. Tekniikka ei ole toistaiseksi käytössä Suomessa, mutta on mahdollista, että alle 10 vuoden sisällä tekniikka laajenee myös Suomeen [40].

2 Tekniikka

Tämä luku käsittelee sähköautoihin liittyvää tekniikkaa ja perusasioita. Luvussa käydään läpi erilaiset lataustavat ja pistokkeet, sekä sähköauton perusteet ja mahdolliset vaihtoehdot akustolle. Sähköauton lataus tapahtuu pääosin erilliseen liittimen kautta, mutta myös langaton lataus tai akuston vaihto on mahdollista. Sähköautot ovat monimuotoisia kokonaisuuksia, jotka vaativat paljon informaatiota, jotta niitä voidaan tarkasti käsitellä. Tämä ei ole tämän luvun tarkoitus, vaan luku selittää sähköauton perusteet, jotta työssä voidaan myöhemmin keskittyä auton energiatarpeeseen ja latauksen vaikutuksiin.

2.1 Sähköautojen lataustavat

Sähköautojen johdolliset lataustavat jaetaan kirjallisuudessa kolmesta neljään eri kategoriaan tai luokkaan, riippuen hieman lähteestä. Monesti ensimmäisen ja viimeisen luokan lataustapojen kuvaukset ovat kirjallisuudessa yhtenäisiä, mutta keskimmäisten lataustapojen määritelmät vaihtelevat hieman. Idea on se, että luokat kertovat, miten, minkälaisella teholla ja mistä sähköautoja ladataan. Tässä tekstissä noudatetaan SFS-EN 61851 standardin mukaista jaottelua [5], mutta erilaisiakin jaotteluitakin on olemassa [6]. Työssä lataustavat on jaettu standardin mukaisesti neljään eri luokkaan.

Luokka 1

Ensimmäinen luokka on tekniikka, missä sähköauto liitetään normaaliin 230 voltin verkkovirtapistokkeeseen [5]. Tämä lataustyyli on lähinnä hätäkäyttöä tai vähätehoisia sähköajoneuvoja varten, mutta sen selvänä etuna on se, että käyttöön sopivia latauspaikkoja löytyy kaikkialta ja erillistä lataus- asemaa ei tarvita. Sopiva latauskohde on esimerkiksi sähköskootteri.

Luokka 2

Koska perinteistä pistorasiaa ei suositella käytettäväksi useaa tuntia 16 ampeerin vaihevirralla [1], niin latausteho jää alle maksimin. Maksimi teho on 3,68 kW kotitalouspistorasiassa. Latausteho lasketaan lausekkeella $P = U \cdot I$, kun sähköauton akuston on oletettu sisältävän vain resistanssia ja U kuvaa vaihejännitettä. Teho rajoittuu kuitenkin, koska normaali kotitalouspistorasia ei kestä pitkäaikaista käyttöä näin suurella teholla.

Luokan 2 lataustapa kuitenkin on lähellä luokkaa 1, koska tässä voidaan käyttää joko normaalia kotitalouspistorasiaa tai kolmivaiheista teollisuuspistorasiaa. Lisämäärityksenä on se, että latausjohdon on täytettävä standardin SFS-EN 62752 vaatimukset, eli käytännössä siinä on oltava mukana ohjaus ja suojaiteyksikkö [7]. Tämä suojaa pistorasiaa ja täten mahdollistaa paremman lataustehon. Tätä lataustapaa voi käyttää, jos varsinaista latausasemaa ei löydy. Sopii vararatkaisuksi tai mahdollisesti kevyille sähköautoille, joiden toimintasäde on pieni ja ajomatka ei ole pitkä.

Luokka 3

Tapa 3 on ensimmäinen tavoista, mitkä ovat tarkoitettu normaaliin sähköauton lataukseen, mutta vaativat lisäksi erillisen latauspisteen. Luokka 3 toimii vaihtovirralla käyttäen kolmivaiheista 16–63 ampeerin, tai yksivaiheista 70 ampeerin latausvirtaa.

Kolmivaiheisella latausvirralla maksimiteho on 43 kW [7], mikä on noin 4 kertaa suurempi kuin tavallisen 2 maksimiteho. Esimerkiksi Tesla model 3 pystyy liitäntäpistokkeensa (11.5 kW) kautta latautumaan täysin yön aikana ja saa tunnissa akustoonsa energiaa yli 70 kilometrin ajomatkalle [6]. Luokka 3 täten on pääosin tarkoitettu sähköautojen normaaliin käyttöön. Lisäksi kyseisellä lataustavalla on mahdollista hallita sähkön syöttöä ja auton latausta tarkemmin.

Luokka 4

Luokka 4 on tasavirralla toimiva pikalataustapa. Tällä tekniikalla autoa ladataan siten, että sähkövirta ei kulje sähköauton sisäisen latausyksikön kautta, vaan sähkö ladataan tasajännitteellä suoraan kulkuvälineen akustoon. Lähteestä riippuen maksimitehoa voidaan tulevaisuudessa kasvattaa jopa 400 kW asti, mutta realistinen arvio latausteholle on pienempi. Tämä tapa on erittäin kätevä järjestelmä esimerkiksi huoltoasemilla, mutta toimii myös muissa kiireellisissä lataustilanteissa. Lataustapa on nopea, esimerkiksi Tesla:n Model 3 Long Range pystyy lataamaan melkein 290 kilometrin matkan vartissa [6]. Tehotarve on niin suuri, että tapa esiintyy pääosin erillisissä latauspisteissä, eikä kotitalouksissa.

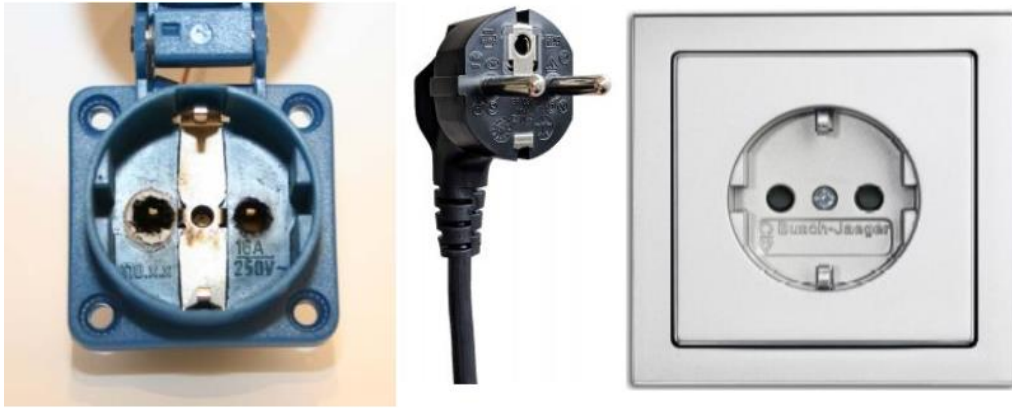
Langaton lataus

Langaton lataus on uusi, mutta mahdollinen tekniikka sähköautojen lataukseen, akuston vaihdon lisäksi. Akuston vaihto on idealtaan yksinkertainen, kulkuneuvon akusto vaihdetaan fyysisesti toiseen, jo valmiiksi ladattuun akustoon. Langaton lataustekniikka toimii siten, että latausalusta muuttaa verkosta saadun vaihtojännitteen tasajännitteeksi ja välittää sähköenergian autolle antennin avulla, siten että latausteho voi olla jopa 11 kW [8]. Hyötysuhde langattomassa latauksessa on noin 92 %, kun taas perinteisemmällä tavalla hyötysuhde on muutaman prosentin suurempi, noin 96 % [8].

2.2 Latauspistokkeet

Tässä kappaleessa käsitellään eri latauspistokkeita, eli latausasemiin tai seinään kiinnitettäviä latausliittimiä. Vaikka pistokkeita on standardoitu, niin samalla lataustavalla voi olla erilainen latauspistoke, riippuen valmistajasta. Kuluttajalla voi täten olla useampi eri latauslaite tai pistoke, jos hän omistaa useamman kuin yhden sähköauton. Tässä kappaleessa käsitellään vain yleisimpiä latausliittin vaihtoehtoja.

Ensimmäinen pistoketyyppi on Schuko pistoke, eli sähköpistoke mikä usein löytyy kotitalouksista. Kuten edellisessä luvussa mainittiin, 16 A latausvirtaa ei voida käyttää pistokkeen yhteydessä kauaa. Täten pistoke ei ole suunniteltu suurille lataustehoille ja jo kahden tunnin jälkeen voi maksimiteholla toimiva pistoke tuhoutua lopullisesti, täten lataustehoa on rajoitettava [5]. Esimerkkinä kuva 1 tuhouneesta Schuko pistokkeesta ja normaalista Schuko liittimestä, sekä pistorasiasta.



Kuva 1, liiallisesta käytöstä tuhoutunut pistorasia [5, s 19] ja Schuko pistoke, sekä pistorasia, muokattu lähteestä 10.

Latausluokkaan 2 sopii myös perinteinen kolmivaihepistoke, kuva 2. Niitä löytyy raskaampien kodinkoneiden yhteydessä, mutta ovat myös yleisiä teollisuudessa. Vastaava pistoke kestää raskaamman kuorman, joten se on soveltuvampi, jos haluaa ladata luokan 2 maksimitehoa hyödyntäen. Vaikka se ei ole suunniteltu sähköautojen kanssa käytettäväksi, niin se on kuitenkin kestävämpi ratkaisu, kuin Schuko pistoke. Tämä edellyttää tietenkin sen, että hyödyllinen kolmivaihelitettä löytyy, mikä ei ole kotitalouksien kanssa niin yleistä.



Type P, 125 A, IP67/IP69

Kuva 2, tyypin P, 125A mitoitettu kolmivaiheinen pistoke [9].

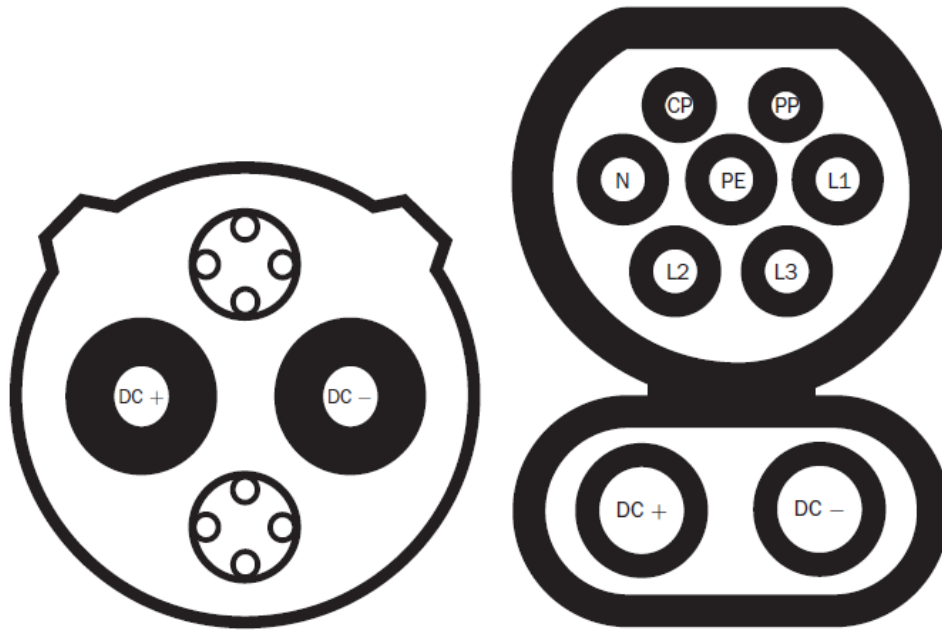
Luokan 3 latauspistokkeet ovat IEC 62196 standardin mukaisia ja niitä kutsutaan tyypin 1 ja 2 pistokeiksi, jälkimmäiseen viitataan usein kirjallisuudessa nimellä Mennekes [11]. Mennekes tyypin pistorasia löytyy kuvasta 3 vasemmalta ja tyypin 1 pistoke oikealta. Tyypin 1 liitin on tarkoitettu 1-vaiheiseen sähkönsiirtoon, mikä rajaa maksimilataustehoksi 7.4 kW. Tyypin 1 pistoke on käytetty Yhdysvalloissa ja Japanissa. Sen eurooppalainen serkku on tyypin 2 pistoke, mikä toimii kolmivaihevirralla ja täten pystyy saavuttamaan suuremman tehon. Sen maksimi käyttövirta on 63 A, mikä kolmella vaiheella johtaisi 25.2 kW:n tehoon. Suomessa käytetään todennäköisemmin 16 A yksivaihevirtaa tai 32 A kolmivaihevirtaa. Suomessa latausteho luokalle 3 täten olisi 3.68–12.8 kW. Tietenkin pitää muistaa, että itse latauslaitteisto voi vielä rajoittaa lataustehoa, joten nämä eivät ole välttämättä realistisia lataustehoja, mutta antavat kuitenkin suuntaa.



Kuva 3, Tyypin 1 ja Tyypin 2 pistokkeet, muokattu lähteestä 11.

Vastaavasi luokalle 4 löytyvät omat liitinmallit Eurooppaan ja Japaniin. Japanissa ja osittain Suomessa käytetty malli on nimeltään CHAdeMO. CHAdeMO on luokan 4 mukaisesti tasavirtapistoke, minkä maksimitehoksi 2021 keväällä oli ilmoitettu 400 kW [1], ja on noussut 200 kW vuodesta 2019 [12]. CHAdeMo sisältää kyvyn hallita latausnopeutta, sekä sen avulla käyttäjä pystyy tarkastelemaan tehonkulutusta. Lisäksi se mahdollistaa lataussuunnan kääntämisen, eli käyttäjä pystyy käyttämään sähköautoaan energiavarastona, mikä mahdollistaa sähköverkkoyhtiöille sähköautojen akuston käyttämisen joustavuuden parantamiseen, jos auton käyttäjä sen sallii.

Toinen luokan 4 mukainen latauspistoke on CCS-Combo, mikä yhdistää luokan 3 pistokkeet ja tasavirta pikalatauksen. Liitin koostuu täten joko kuvan 4 mukaisesta tyypin 1 tai tyypin 2 pistokkeesta. Tyypin 2 yhdistelmä on laajalti käytössä Euroopan alueella, mukaan lukien Suomessa. Tästä lähtien viitattaessa CCS-Comboon, vitataan tyypin 2 yhdistelmään, koska se on relevantti malli sekä Suomessa että Euroopassa. CCS-Combo pystyy saavuttamaan 400 kW:n maksimitehon [13], mutta yleinen maksimi kyseiselle pistokkeelle on 350 kW. Tyypin 2 CCS-Combo liittimiä on kaksi eri versiota, alemmassa kuvassa esitetty Mennekes versio ja ”normaali versio”, mistä puuttuvat kuvan 4 mukaiset L1, L2 ja L3 liitoskohdat ja nollajohto. Tasavirtaliitimet hoitavat näiden työn, kun pistoketta käytetään. Mennekes version etu on käyttäjän mahdollisuus hyödyntää normaalia Mennekes liitintä, jos käyttäjä näkee tämän hyödylliseksi.



Kuva 4, Vasemmalla CHAdeMo pistoke ja oikealla Mennekes version tyypin 2 CCS-Combo liittimestä. Muokattu versio lähteestä [6].

Lisäksi Teslalla on oma pikalatausjärjestelmänsä, Tesla Supercharger. Tämä järjestelmä sopii vain yrityksen valmistamiin autoihin. Sen maksimilatausteho on 250 kW [1]. Latauspistokkeita on kolme eri versiota, mistä kaksi ensimmäistä ovat ulkonäöltään luokan 3, tyypin 2 latausliittimiä, eli vastaavia kuin kuvassa 3, mutta niiden maajohtin on hieman eri muotoinen [1, s 32], estäen Teslan lataamisen muilla latausratkaisuilla. Versiot 1 ja 2 ovat kuvan 5 mukaisia [1, s 32], täten Teslan latausasemat eivät vastaanota muiden yritysten ajoneuvoja. Versio 3 vastaa CCS latausliitintä [1, s 33].



Kuva 5, Teslan latausliitin, muokattu lähteestä [1]

2.3 Yleistä sähköautoista

Sähköautot jaetaan kolmeen eri kategoriaan; täyssähköautoihin, hybrideihin ja ladattaviin hybrideihin. Työssä sähköistetyt ajoneuvot jaetaan kolmeen eri osa-alueeseen. Henkilöautoihin, julkisiin ajoneuvoihin ja raskaisiin ajoneuvoihin.

Kevyet ladattavat sähköiset kulkuneuvot, kuten sähköskootterit, pääosin sivuutetaan. Niiden vaatima teho on pienempi ja täten vaikutus ympäröivään sähköverkkoon pienempi.

Sähköauto on sähköllä toimiva ajoneuvo, joka saa energian joko lataamalla sähköenergian suoraan verkosta tai muuttamalla muun polttoaineen sähköksi. Ensimmäiseen kategoriaan kuuluvat EV:t (electric vehicle) ja PHEV:t (plug in hybrid electric vehicle), kun taas HEV:t (hybrid electric vehicle) kuuluvat jälkimmäiseen, vaikka myöskään PHEV ei sähköä välttämättä tarvitse.

Hybridiauto sisältää yleensä kaksi voimalähdettä, sähkömoottorin ja polttomoottorin. Perinteinen hybridiauto lataa generaattorin avulla akustoa, joka taas syöttää sähkömoottoria. Etuna tässä on se, että suuremmalla kuormalla hybridiauto voi käyttää polttomoottoria, kun taas sähkömoottorin suurempi hyötysuhde on hyödyllinen kevyessä käytössä, kuten kaupunkiajossa. Joissakin tapauksissa tosin polttomoottori on kytketty vain generaattoriin, eikä auton akselistoon. Täten auto toimii vain sähkömoottorin avulla, mutta hyöttyy myös muista sähköauton eduista. Tätä tapaa kutsutaan sarjakkonfiguraatioksi, kun taas edellinen esimerkki on rinnakkaiskonfiguraatiosta [12]. Yhdistelmäratkaisuja myös löytyy.

Ladattavan hybridin ero on se, että nimensä mukaisesti käyttäjä pystyy yhdistämään ulkoisen sähkölähteen suoraan ajoneuvon akustoon, usein vain erillisen, ajoneuvon sisäisen latausyksikön kautta. Mahdollistaa muun muassa pienemmän polttoaineen kulutuksen johtuen siitä, että polttomoottoria ei välttämättä tarvita kuin vain nopeisiin kiihdytyksiin ja toimintasäteen kasvattamiseen. Täyssähköauto on periaatteessa PHEV ilman polttoainemoottoria, mutta käytännössä ne sisältävät suuremman akuston toimintasäteen kasvattamiseksi.

2.4 Akusto

Pitkäikäiseksi sähköauton akuksi sanotaan akkua, mikä kestää 200000 kilometrin ajomatkan, ilman, että akuston nimelliskapasiteetti laskee merkittävästi [15]. Sähköautoissa käytettävät akkutyypit ovat: litium-rautafosfaatti, litiumioni, litiumpolymeeri, sinkki-ilma, sulasuola, lyijy, nikkeli-kadmium ja nikkelimetallihybridi [15].

Litium-rautafosfaatti ja litiumioni akku omaavat korkean energiatihedden, mutta litium-rautafosfaattiakusto kestää suuremman määrän purkukertoja ja ei ole niin räjähdysherkkä. Se on kuitenkin kaksikosta kalliimpi. Molempien nimellisjännite on 3.2 V, mikä sopii hyvin sähköautoihin [15]. Energiatiheydet löytyvät taulukosta 1.

Taulukko 1, akkujen energiatiheddet, lyijy [14], muut [15].

Akkutyyppi	Energiatiheys (Wh/kg)
Litium-rautafosfaatti	120
Litiumioni	400
Litiumpolymeeri	100–130
Sinkki-ilma	200
Sulasuola	90
Lyijy	30
Nikkeli-kadmium	50
Nikkelimetallihybridi	60

Nähdään, että energiatihedeltään litiumioni ja sinkki-ilma ovat selvästi suurimpia. Nämä ovat täten litium-rautafosfaattiakuston kanssa mielenkiintoisia vaihtoehtoja. Sulasuola on myös lupaava tulevaisuuden vaihtoehto, koska akun rakennusmateriaalit ovat edullisia ja koska sen energiatihelyttä voidaan parantaa ilman avulla [15, s 7]. Akkuteknologia on yksi sähköautoja rajoittavista tekijöistä, koska se käytännössä rajoittaa auton toimintasäteen. Tällä hetkellä litium pohjaiset akut ovat suosittuja, mutta sinkki-ilma ja sulasuola akut voivat olla lupaavia vaihtoehtoja.

Energiatiheys ei kuitenkaan kerro koko totuutta sähköistetyn ajoneuvon akkukapasiteetista, se kertoo vain eri akkutekniikoiden potentiaalinen sähköauton energialähteenä. Todellisten sähköautojen akustojen kapasiteetin tutkiminen antaa tässä suhteessa relevantimpaa tietoa. Sähköistettyjä automalleja on kuitenkin paljon ja kaikkien niiden tutkiminen veisi paljon aikaa, joten työssä keskitytään muutamaani valikoituihin automalleihin. Autojen kapasiteettien lisäksi taulukko sisältää myös suurimman mahdollisen toimintasäteen.

Taulukko 2, valittujen sähköautojen akustojen kapasiteetit [16], [17], [18], [28], [19]

Malli	Akuston kapasiteetti (kWh)	potentiaalinen toimintasäde (km)
Nissan leaf	40	239
Nissan leaf (suurempi akusto)	62	363
Tesla model 3	50	354
Tesla model 3 long range	75	499
Hyundai Kona	39.2	305
Hyundai Kona long range	64	484
Volkswagen id 4	52	346
Volkswagen id 4 suurempi akusto	77	522

Tuloksista nähdään selvästi se, että eri autojen hyötysuhde vaihtelee, eikä akun koko kerro kaikkea sähköauton energian toimintasäteestä. Täten sähköauton kulutusta ei voida tarkasti määrittää sen ajaman matkan perusteella, vaan siinä pitää huomioida myös sähkön kulutus ajoneuvotyyppikohtaisesti. Kaupunkikäytössä olevan sähköbussin akuston kapasiteetti ei eroa merkittävästi sähköautosta, esimerkiksi Tampereen litiumtitanaatti akustoisen sähköisen linja-auton akuston kapasiteetti on vain 40 kWh [21, s14], mikä vastaa Nissan leaf:n standardiversion akuston kapasiteettia. Kaukomatkan bussissa akusto on tietenkin suurempi, Pohjolan liikenne käyttää 324 kWh:n kapasiteetin akustoa [20]. Luvussa 4 kerrotaan lisää tutkimuksen ajoneuvoista.

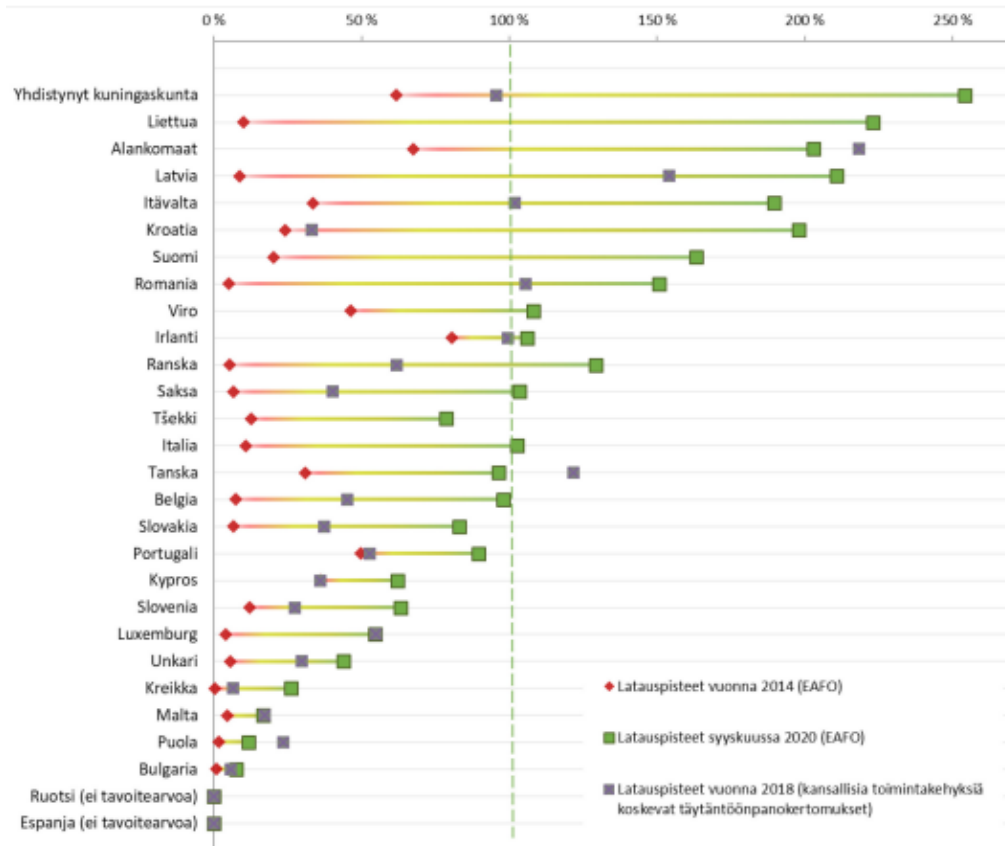
3 Standardit ja direktiivit

Tarkasteluun liittyvät standardit, direktiivit ja säännökset käsittelevät kolmea eri osa-aluetta. Nämä ovat latauspisteet ja niiden osat, sähköautot ja niiden leviäminen, sekä sähköverkot. Direktiivit koskevat pääosin EU:n päätöksiä, mitkä täten vaikuttavat Suomen hallinnon päätöksiin ja toimivat hyvänä pohjana tälle tutkimukselle. Lisäksi ne kertovat, miten sähköautojen ja niiden latauspisteiden leviämistä säädellään Euroopan ja Suomen alueella.

3.1 EU

EU vaikuttaa sähköistettyjen ajoneuvojen lisääntymiseen ja yksi esimerkki tästä on European Clean Bus deployment initiative [22]. Tämän aloitteen tarkoitus on tehdä julkisesta liikenteestä päästötöntä. Aloite on tehty vuonna 2016, mutta sen vaikutukset näkyvät esimerkiksi siinä, että useat kaupungit ovat suunnitelleet lopettavansa dieselkäyttöisten linja-autojen käytön. Näistä kaupungeista esimerkkejä ovat muun muassa Lontoo, Berliini ja Varsova. Tämä koskee myös Suomea, koska Tampereen kaupunki on osallistunut aloitteeseen. Tällaiset aloitteet luovat pohjan sekä julkisen että myös yksityisen liikenteen sähköistymiselle.

Lisäksi Euroopan unioni painottaa sähköautojen latauspisteiden lisäämistä muun muassa AFID-direktiivillä. Direktiivin päätarkoituksena on lisätä latauspisteitä siten, että ”sähkökäyttöiset ajoneuvot voivat liikkua ainakin kaupunkitaajamissa, esikaupunkialueilla ja muilla tiheästi asutuilla alueilla sekä tarvittaessa jäsenvaltioiden määrittämien verkkojen sisällä” [4, s 18]. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että jäsenvaltioiden on lisättävä EU:n määräämän määrän verran tarvittavia latauspisteitä, kunnes tavoite on saavutettu. Valitettavasti tässä Euroopan Unioni ei määrittele latauspisteiden tyyppiä tai sähköautojen luokkia [4], vaikka tiedetään että esimerkiksi tehot voivat vaihdella paljonkin eri latauspisteiden välillä. Tavoite tässä on se, että jäsenvaltioissa olisi yksi latauspiste kymmentä sähköajoneuvoa kohden. Valitettavasti määräaikaisesti tämä ei ole toteutunut kuin muutamassa jäsenvaltiossa [4]. Tämä nähdään myös kuvasta 6.



Kuva 6, 2014–2020 Toteutuneet latauspisteet eri jäsenvaltioissa suhteessa AFID direktiivin tavoitteeseen [4].

Latauspisteiden määrän lisäämistä Euroopan Unioni avustaa 280 miljoonan euron tukirahalla [4]. Tämä tukiraha on osa suurempaa CEF rahoitusta, minkä tavoitteena on lisätä vaihtoehtoisten polttoaineiden, eli vedyn, maakaasun ja sähkön käyttöä tiekulkuneuvojen polttoainevaihtoehtoina. Tavoitteena on ollut, että vuoteen 2025 mennessä Euroopan unionin alueella olisi yhteensä miljoona latauspistettä, kuitenkin vuonna 2020 latauspisteitä oli vain noin neljännes tästä.

International Electrotechnical Commission on järjestö, mikä valvoo muun muassa on EU:n tasolla sähköautoihin liittyviä standardeja, esimerkiksi IEC TC 69. Kyseinen standardi kertoo tarkat määritelmät sähköauton toiminnallisuuteen ja osa-alueisiin nähden [23].

3.2 Suomi

Sähköautojen lataustekniikka sisältää useita standardisointikohteita. Standardit määrittävät kaiken toiminnan sähköautojen latauskaapeleista, itse auton toimintaan asti. Syvälinen tutustuminen standardeihin ei kuulu tähän työhön, vaikkakin niiden merkitys alan kehityksen kannalta on suuri. Jos aihe kiinnostaa enemmän, niin standardien tutkiminen voi antaa lukijalle arvokasta lisätietoa asiasta. Sähköistettyihin ajoneuvoihin liittyvät standardit ovat seuraavat:

Taulukko 3, Lyhyet kuvaukset relevanteista standardeista, muokattu lähteestä 24.

Standardi	Selite
SFS 5610	Kuvaa kotitalouksiin ja vastaaviin liitettävät pistokkeet, esimerkiksi Schuko tyyliset pistorasiat.
SFS 6000 sarja	Sisältää kohdat standardisoimaan johtojärjestelmistä sähköajoneuvojen syöttöön.
SFS-EN 50620	Erilaiset kaapelit ja johdot sähköajoneuvoja varten
SFS-EN IEC 61851	Kohta 1 sisältää yleiset vaatimukset sähköajoneuvojen latauspistokkeita ja järjestelmiä varten.
SFS-EN 62752	Johtojen hallintajärjestelmän ja suojauslaitteiston standardisointi luokan 2 latausjärjestelmälle.
IEC 61980-sarja	Langattoman latausjärjestelmän standardisointi sähköautoja varten

Tulevaa latauspisteiden tarvetta voidaan lähteä estimoimaan tarkastelemalla esimerkiksi eduskunnan vastausta EV 108/2020 vp. Tämä on vastaus hallituksen esittämään kysymykseen koskien sähköajoneuvojen latauspisteitä [25]. Tämä määrittelee, että jokaista rakennettavaa, sekä olemassa olevaa, pitäisi rakentaa vähintään yksi normaalitehoinen latauspaikka seuraavan taulukon mukaisesti.

Taulukko 4, latauspaikkojen minimivaatimukset.

Pysäköintipaikkojen määrä	Latauspisteiden minimi määrä	Teho
11–50	1	Normaali
51–100	2	Normaali
yli 100	3	Normaali

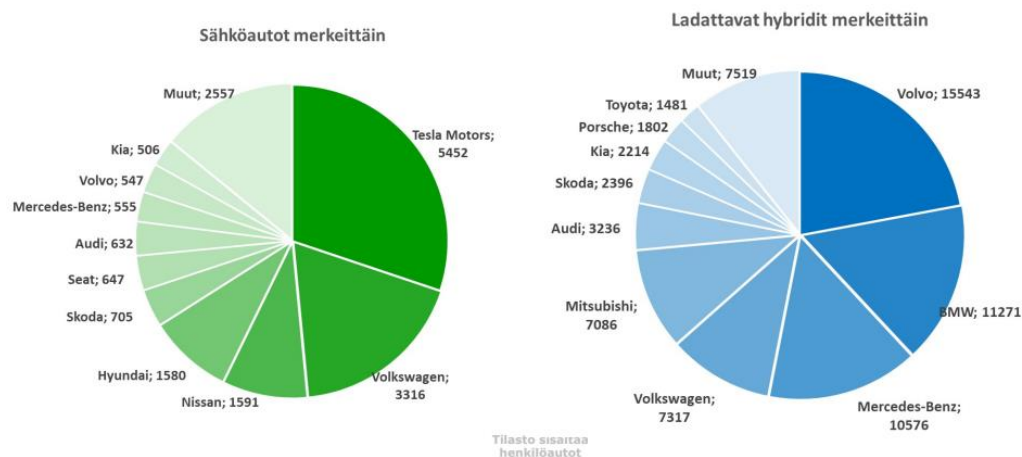
Taulukossa 4 normaali latausteho tarkoittaa 2014/94/EU liitteen II mukaista lataustehoa, eli latauspistettä, mikä mahdollistaa 22 kW tehon, mutta ei laitetta, minkä teho on alle 3.7 kW. Latauspisteiden on oltava yksityistalouksille asennettuja, tai julkisia. Lisäksi niiden ensisijaisen tarkoituksen on oltava sähköautojen lataus [11].

Kyseinen eduskunnan vastauksen artikla (6 §) antaa myös lisämäärityksenä, jos latauspaikkoja on 11–30, on latauspistevalmius oltava vähintään 50 %:ssa latauspaikoista ja kun pysäköintipaikkojen määrä kasvaa yli 30 %, niin latauspistevalmius tulee olla minimissään 20 % latauspaikoista, niin että latauspistevalmiita paikkoja on minimissään 15 [25].

Esimerkiksi suurten markettien parkkipaikat saattavat sisältää 400:aa [26] parkkipaikkaa, mikä tarkoittaisi vähintään 40 latausvalmiita parkkipaikkaa ja vähintään kolmea normaalitehoisella latauspisteellä varusteltua latauspistettä. Eduskunnan vastaus määrittää latauspistevalmiin paikan seuraavasti: ” 1) latauspistevalmiudella tarkoitetaan putkitusta tai muita johtoteitä, joihin voidaan myöhemmin asentaa tarvittava kaapelointi sähköajoneuvojen latauspisteitä varten, sekä kaapelointia sähköajoneuvojen latauspisteitä varten” [25].

4 Latausenergian tarpeet eri käyttökohteissa

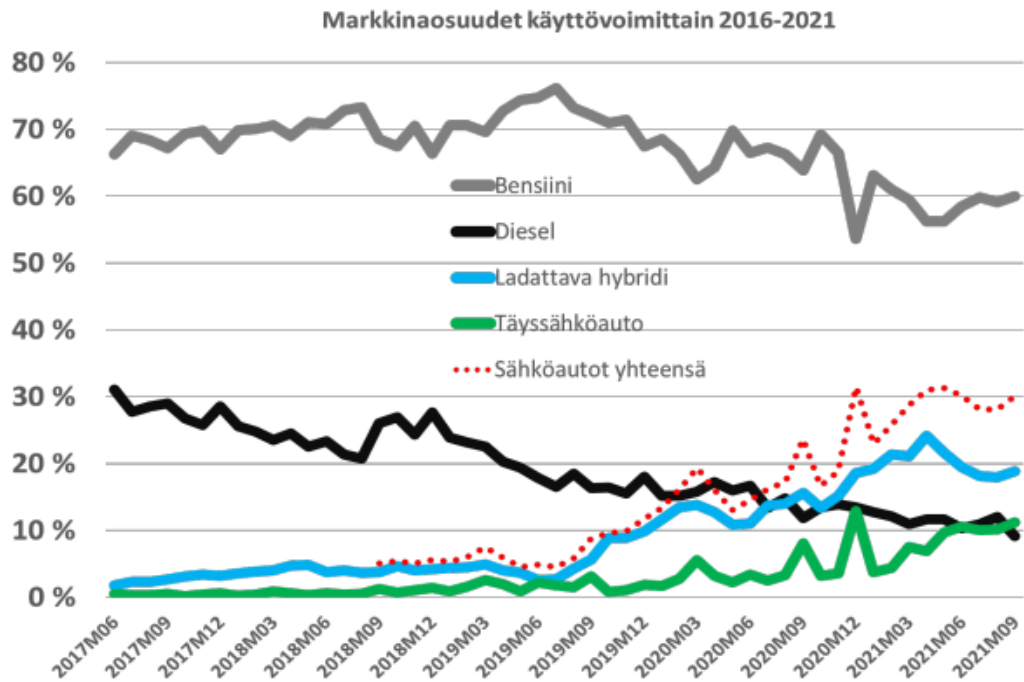
Tässä kappaleessa tarkastellaan latausenergian tarvetta kolmessa eri osa-alueessa. Nämä ovat henkilöautot, ladattava julkinen liikenne ja raskas liikenne. Jotta työn laajuus pysyy realistisena, on hyväksyttävä se, että seuraavat asiat tuovat työhön epätarkkuutta ja virheitä tarkasteluun. Suuren ajoneuvomäärän kulutuksen tarkastelu on työssä suuripiirteistä, johtuen siitä, että kulutuksen tarkka tarkastelu on erittäin vaikeaa, jos ei mahdotonta. Tämä johtuu siitä, että jokainen eri sähköautomalli kuluttaa eri tavalla ja jokainen ihminen ajaa eri tehokkuudella, johtuen ihmisten ajotavoista ja ajo-olosuhteista. Työssä tarkastellaan kulutusta kappaleessa 1 mainituilla ajoneuvoilla, ja suuren ajoneuvomäärän tarkastelut ovat aina approksimaatiota. Lisäksi 10 vuoden päässä olevaa sähköautojen kirjoa on mahdollista tarkastella, joten automallien valinnat ovat täysin mielivaltaisia, kuitenkin tosin työssä tarkasteltavat sähköautot ovat aitoja markkinoilla olevia kulkuneuvoja. Ajoneuvojen hintakirjo vaihtelee, esimerkiksi Hyundai Kona:n hinta on noin 34 492 € [18, katso 1] kun taas Tesla model 3:n hinta on 48 690 € [28]. Valitut sähköautot kuuluvat suomen suosituimpiin sähköautomerkkien mallistoihin. Tämä nähdään kuvasta 7.



Kuva 7, Suomen ladattavat hybridit ja sähköautot vuoden 2021 kolmannella neljänneksellä, muokattu lähteestä [63]

Miten tämä kuvaa automallien todellista käyttöä? Vuonna 2019 keskimääräisen uuden ajoneuvon hinta oli 34 000 € [29], mikä vastaa Kona:n ja esimerkiksi Nissan Leaf:n hintoja [30]. On epätodennäköistä, että talous sisältää usean uuden ajoneuvon, joten arvio on epätarkka, mutta hintaluokka on realistinen.

Ongelmana on se, että käytettyjä sähköautoja on vähemmän markkinoilla, koska ne ovat vasta leviämävaiheessa sähköautot ostetaan käytännössä katsoen uutena tai vähän käytettynä. Tilanne voi kuitenkin olla tulevaisuudessa erilainen, esimerkiksi vuonna 2030. Myöhempänä ajankohtana on mahdollista ja jopa realistista, että kysyntä on muuttunut ja täten käytettyjä sähköautoja ostetaan enemmän. Sähköautojen muunnin kasvu nähdään myös kuvasta 8.



Kuva 8, suomen autokannan kehitys 2017–2021, [63].

4.1 Henkilöautot

Jotta voidaan tutkia latausenergian vaikutusta ympäröivään sähköverkkoon, on tarkasteltava ensin tulevaa sähkön kulutusta ja sen luomia rasitteita. Tässä osiossa ei oteta kantaa verkon kestävyteen, vain tarkastellaan mitkä ovat sellaisia asioita, jotka voisivat sähköverkkoa rasittaa.

Ensin tarkastellaan energiaa kulutusta ajoneuvoakohtaisesti. Tässä ideana on saada käsitys siitä, minkälaista sähköauton vaatima keskimääräinen päiväinen on. Oletuksena on se, että autoa ajetaan mahdollisimman tehokkaasti ja että olosuhteet ovat ideaaliset.

Tämä antaa minimikulutuksen. Koska oikeasti ihminen ei aja aivan täydellisesti ja ympäristö, esimerkiksi talvikeli voi lisätä kulutusta, niin kulutus ei ole aivan realistinen. Minimikulutus on kohdistettu ajettua kilometriä kohden yksikössä $\frac{kWh}{km}$. Se lasketaan seuraavasti.

$$\text{Minimikulutus} = \frac{\text{Akuston kapasiteetti (kWh)}}{\text{Toimintasäde (km)}} \quad (1)$$

Tämä toimii silloin, kun käytetään valmistajan tai muun luotettavan lähteen mukaista maksimitoiminta sädettä ja maksimikapasiteettia. Päivän energian kulutus taas saadaan kertomalla minimikulutus päivässä keskimäärin ajetuilla kilometreillä. Traficom:in vuoden 2016 tieliikennetutkimuksen mukaisesti suomessa ajetaan henkilöautolla keskimäärin 41 kilometriä päivässä [32]. Lähde on vuodelta 2016, mutta on vaikea uskoa, että tilanne eroaisi hirveästi nykytilanteesta [32]. Hieman vastaavasti tieliikenne käyttäytymistä on tutkittu myös Saksassa ja Ruotsissa, joissa päivän keskimääräiset ajomatkat olivat 50.6 ja 57.1 km, kyseinen tutkimus on myös vuodelta 2016.

Taulukko 5, autojen tekninen data [16],[28],[27],[19]

Automalli	Leaf	Leaf (suuri akusto)	Kona	Kona long range	Model 3	Model 3 long range	Volkswagen id 4	Volkswagen id 4
Toimintasäde (km)	239,79	363,71	305	484	354	499	346	522
Akuston kapasiteetti (kWh)	40	62	39,2	64	50	75	52	77
Estimoitu kulutus (kWh/km)	0,17	0,17	0,13	0,13	0,14	0,15	0,15	0,15
Päivittäisen ajomatka(km)	41,00	41,00	41,00	41,00	41,00	41,00	41,00	41,00
Päivittäisen kulutus (kWh)	6,8	6,99	5,27	5,42	5,79	6,16	6,16	6,05

Latausenergian arvioiminen ei ole helppoa, kuten on aikaisemmin todettu. Suurin realistinen energiankulutus saadaan, jos oletetaan, että vuoteen 2030 mennessä toteutuu valtioneuvoston tavoite 700 000 sähköhenkilöautosta [34, s 21]. Olettaen, että autoja on jakaantunut tasaisesti, niin keskimääräinen kulutus, voidaan laskea yksinkertaisesti:

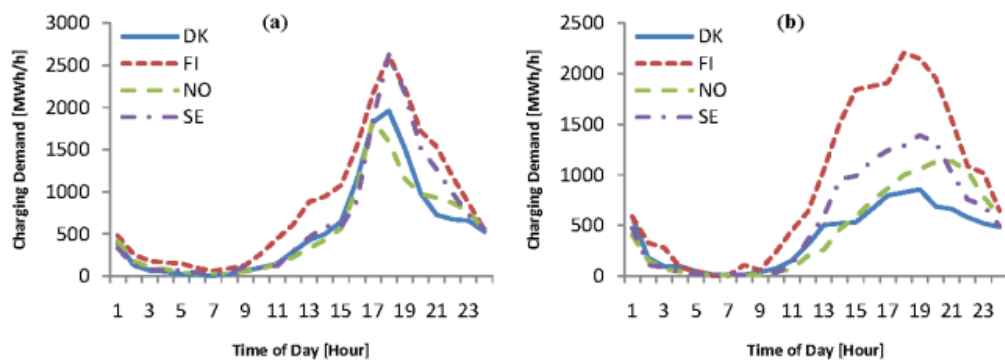
$$\frac{\sum \text{päivittäiset kulutukset}}{\text{autojen määrä}} \quad (2)$$

Päivän satunnaisesti valitun keskimääräinen päivittäinen kulutus olisi täten noin 6.09 kWh per sähköauto, tämän laskemiseksi on autojen määrä korvattu tutkimuksen eri automalleilla, nämä on saatu taulukosta 5. Tämä on autojen oma kulutus, mutta latauspisteiden vaatiman tehon vuoksi, kulutus sähköverkon kannalta voi olla suurempi. Latauspisteiden kuluttama teho koostuu, sekä sähköauton vaatimasta tehosta, mutta myös tehohäviöstä, kuten kaapeleiden lämpenemisestä. Päivässä kuluisi noin 4259 MWh sähköä pelkästään sähköautoista johtuen. Sähköautojen energian kulutuksen arvio on tietenkin epätarkka. Tämä johtuu siitä, että ei voida olettaa, että vain työssä tarkasteltavia sähköautoja olisi käytössä suomessa ja että ne olisivat tasaisesti jakaantuneita. Tämä antaa kuitenkin suuruusluokan tehotarpeelle. Toinen tapa arvioida autojen energiakulutusta on hyödyntää kuvan 7 kaltaisia tilastoja. Valitsemalla tästä neljän suurimman autovalmistajan auton keskimääräisen kulutuksen taulukosta 5, saamme päivittäiseksi keskikulutukseksi 5,96 kWh, mikä on pienempi kuin edellinen arvio. Tässä käytetään pienemmän akuston kapasiteetin omaavia versioita. Täten päivässä kuluisi noin 4174.5 MWh. Suomessa kuluu päivittäin noin 225528 MWh sähköä, mikä laskettu lähteen 35 avulla käyttäen kuluvan vuoden keskiarvoa. Näemme että energiantarve ei tule olemaan ongelma, vaikkakin latausenergia tulee häviöiden ansiosta olemaan hieman suurempi. Jos jokainen suomen auto (2,7 miljoonaa) korvattaisiin sähköautolla, niin sähkönkulutus kasvaisi 10–12 % [74].

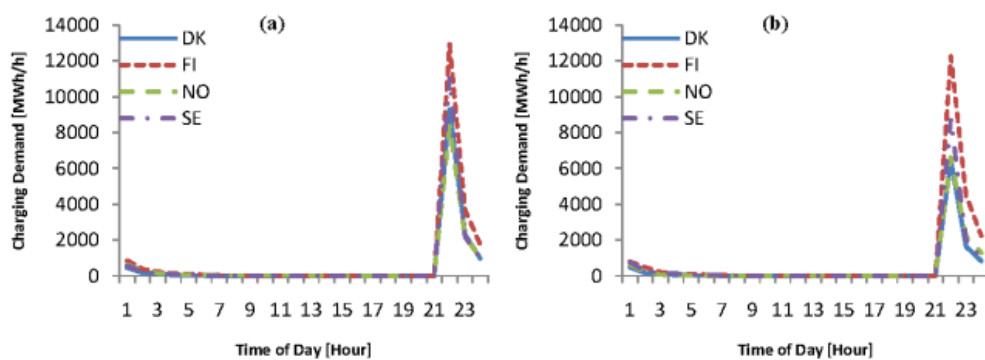
Sähköenergiaa ei kuitenkaan ladata tasaisesti, vaan se vaihtelee latausratkaisujen ja lataustehon mukaisesti. Sähköautoja voidaan ladata kolmella eri tavalla. Ensimmäinen tapa on jatkuva aikainen lataus, eli auto latautuu koko ajan, kun pistoke on kiinnitetty. Toinen tapa on ajastettu lataus, eli auto latautuu vasta, kun ajastin sen mahdollistaa.

Kolmas tapa on hintariippuva lataus. Tämä tapa perustuu mahdollisimman pieneen sähkönhintaan, eli autoa ladataan, kun sähkön hinta on matala [38]. Nämä tavat muodostavat omat kulutuskäyränsä ja täten kuormittavat verkkoa eri teholla.

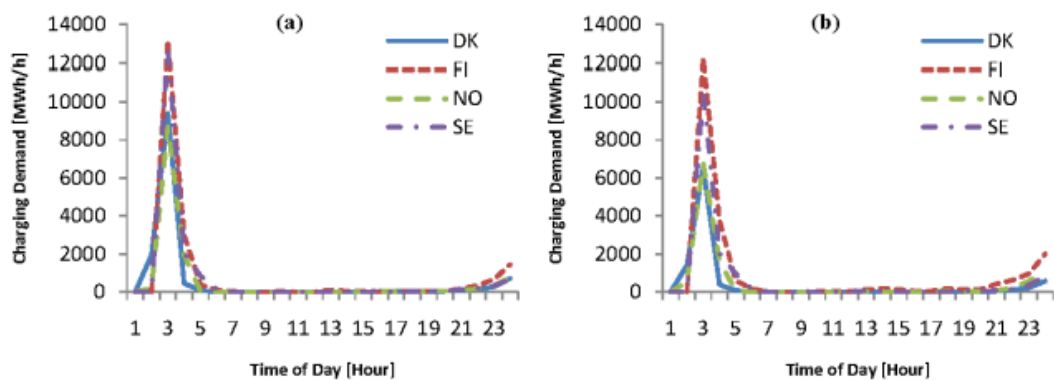
Asiasta tehty tutkimus Day-Ahead Planning with 100 % Electric Vehicle penetration in the Nordic Region (Liu Zhaoxi, et al) kuvaa eri lataustapojen kulutuskäyriä. Työssä esitetään näistä vain muutama.



Kuva 9, sähköauton vapaan latauksen latauskäyrä (11,04 kW), a kuvaa viikonpäiviä, b viikonloppuja [38].



Kuva 10, sähköauton ajastetun latauksen latauskäyrä (11,04 kW), a kuvaa viikonpäiviä, b viikonloppuja [38].



Kuva 11, ELSpot hintaan perustuva sähköauton latauskäyrä (11,04 kW), a kuvaa viikonpäiviä, b viikonloppuja [38].

4.2 Julkinen liikenne

Julkisen liikenteen sähköistyminen on kasvava ilmiö. Tämä näkyy esimerkiksi Helsingissä ja Tampereella, missä sähköbussit ovat lisääntyneet. Syitä on monia, mutta esimerkiksi Euroopan unionin European Clean Bus deployment initiative [22] ja ympäristöhuolet lisäävät sähköbussien määrää.

Taulukosta 6 nähdään, että sähköbussien energiantarve kilometriä kohden on pieni, vaikkakaan ei aivan henkilöautojen tasolla. Kun ei oteta huomioon matkustajamäärien vaihtelua. Matkustajamäärään suhteutettuna energiantarve on tietenkin vielä pienempi.

Taulukko 6 Sähköbussien energiantarpeet, [39],[21] ja [41]

Sähköbussi malli	Yutong	Ebusco 2.2	BYD	VDL	Xunmin	Proterra	Ebussystems, VTT
energiantarve (kWh/km)	1,0–1,5	0,9	1,3	1,4	1,5	1,1	0,6

Valtioneuvoston julkaisu kertoo suuripiirteisesti sähköbussiliikenteen tavoitteen vuoteen 2030 mennessä. Tavoite on noin 6200 sähköbussia [34, s 22]. Tässä työssä seuraavaksi esitetty arvio sähköbussien kulutukselle on suuripiirteinen, koska bussien kulutus vaihtelee eri ajoreittien, matkustajamäärän ja mallien mukaisesti [42, 2 20], ei yleistys tuota yhtä tarkkaa tulosta kuin henkilöautoilla. Arviota varten tarvitaan päivittäinen keskimääräinen ajomatka, mikä saadaan tilastokeskuksen tieliikenteen suoritelaskelmasta, jonka mukaan vuodessa linja-autot kulkevat keskimäärin 614 miljoonaa kilometriä [43, s 16]. Täten päivittäinen ajomäärä olisi suunnilleen 1.68 milj. km. Vuonna 2018 suomessa oli linja-autoja 12 481 kappaletta [72] täten yksittäinen linja-auto ajoi päivässä noin 134,6 km. Energian kokonaiskulutus aikaisemmin mainituilla linja-autoilla on esitetty taulukossa 7:

Taulukko 7, linja-autojen päivittäinen vuoden 2030 kulutusarvio.

Energian kulutus päivässä	Yutong (suurempi kulutus)	Yutong	Ebusco 2.2	BYD	VDL	Xunmin	Proterra	Ebussystems, VTT
Kokonaiskulutus (MWh)	2523	1513	2186	2355	2523	1850	1009	1513
Yksittäisen linja-auton (kWh)	201,91	134,61	121,14	174,99	188,45	201,91	148,10	80,76
Keskikulutus (KWh)	156,48							

Kokonaiskulutus on laskettu ajokilometrien mukaisesti. Sähkölinja-autoilla kulutus ei vastaa täysin henkilösähköautojen kulutusta. Tämä johtuu pidemmistä ajomatkoista ja niiden pituuksien vaihteiluista. Epätarkkuus on suuri, joten arvio on suuntaa antava. Esimerkki oikeasta sähköbussin energiakulutuksesta löytyy taulukosta 8.

Taulukko 8, sähkölinja-auton päivittäinen energiakulutus, muokattu lähteestä [42, s 26].

		BusId	Day	Energy consumed, Kwh	Distance travelled, km
1		256	01 August 2018	0.7	0.16
2			13 August 2018	109.4	107.06
3			14 August 2018	197.3	192.44
4			15 August 2018	222.7	198.83
5			16 August 2018	113.1	106.65
6			17 August 2018	233.2	187.01
7			18 August 2018	200.2	183.77
9			20 August 2018	78.7	41.26

Kuten nähdään, päivittäinen energian kulutus voi vaihdella paljon pelkästään yhdellä sähkölinja-autolla. Taulukon 7 mukaan päiväkulutus keskimäärin olisi noin 156,48 kWh, ja jos linja-autoja olisi 6200, niin päivittäinen kulutus olisi 970.16 MWh. Täten sähköbussien vaatima energiantarve tulee noin neljäsosa suhteessa henkilöautoihin.

4.3 Raskas liikenne

Liikenteen sähköistymisen vaikutukset näkyvät myös raskaassa liikenteessä. Kuten henkilöautoille ja julkiselle liikenteelle, myös raskaalle kalustolle on valtioneuvosto asettanut tavoitteita, jotka on saavutettava vuoteen 2030 mennessä. Valtioneuvoston periaatepäätös kasvihuonepäästöjen vähentämisestä kertoo, että Suomessa vuonna 2030 olisi 4600 sähköistä kuorma-autoa [34, s 20]. Nykyinen ajoneuvomäärä ja liikennesuorite saadaan seuraavasta tieliikenteen suoritelaskelmasta, kuva 12.

2018	Liikenne- suorite (milj.km)	Ajoneuvo- kanta (kpl)	Keskim. Ajosuorite (km)
1. Kuorma-auto ilman perävaunua	542	23 913	22 670
enintään 4v	114	2 822	40 240
yli 4v	429	21 091	20 319
2. Puoliperävaunuyhdistelmä	476	6 172	77 147
enintään 4v	159	1 660	95 876
yli 4v	317	4 512	70 257
3. Varsinainen perävaunuyhdistelmä	1 400	19 178	72 975
enintään 4v	591	5 473	108 064
yli 4v	808	13 705	58 962
4. Kevyet kuorma-autot, 3,5 - 6 t	516	32 208	16 011
5. Muuhun kuin tavarankuljetukseen tarkoitettut kuorma-autot, min 6t	117	8 240	14 221
6. Liikennekäytöstä väliaikaisesti poistetut	360	66 156	5 442
Vähintään kaksi eri kertaa poistetut	99	7 550	13 141
Kerran poistetut	261	14 894	17 513
Koko vuoden poissa liikennekäytöstä	0	43 712	0
Kaikki yhteensä	3 411	155 867	30 411

Kuva 12, kuorma autojen määrät ja ajokilometrit vuonna 2018 [43, s 14 1.10].

Kuvan 12 avulla voidaan laskea kuorma-autolle keskimääräiset ajokilometrit vuonna 2018, jota voidaan käyttää pohjana kuorma-autojen keskimääräisille ajomatkoille. Tämäkään ei ole täysin tarkka tulos, mutta koronatilanteen vuoksi vuodet 2020–2022 eivät kuvaa normaalia liikenteen käyttäytymistä, joten 2018 on toimiva lähtökohta. Tässä työssä ei oteta huomioon väliaikaisesti poistettuja ajoneuvoja, koska väliaikaisesti poistetut kuorma autot eivät ole jatkuvassa käytössä ja ajavat niin epä-säännöllisesti, että niiden vaikutuksen arviointi ei onnistu järkevästi eikä täten sovi keskimääräiseen tarkasteluun. Keskimääräinen ajomatka on täten:

$$\frac{(542+476+1400+516+117)10^6 \text{ km}}{23913+6172+19178+32208+8240} \approx 34009 \text{ km}$$

Tämä on keskimäärin kuorma-auton vuodessa ajama kilometrimäärä. Jakamalla luku vuoden päivien määrällä, saadaan päivässä kuljettu keskimääräinen ajomatka, mikä on noin 93 km. Seuraava taulukko on muodostettu sillä oletuksella, että päivittäinen ajomatka on keskimäärin sama, kuin vuonna 2018.

Taulukko 9, kuorma-autojen kulutuksen laskentaa, [64],[65],[66],[67],[67].

Malli	e actros	e tgm	FL electric	D Z.E.	D Wide Z.E.	FH electric
Akuston kapasiteetti kWh	240	185	317	300	200	540
Toimintasäde km	200	190	300	300	200	300
Keskimääräinen kulutus kWh/km	0,83	1,03	0,95	1	1	0,56
Päivittäinen ajomatka km	93	93	93	93	93	93
Päivittäinen kulutus kWh	77,5	95,51	88,013	93	93	51,67
Keskikulutus kWh	83.12					

5 Latausverkon rakenne

Tässä luvussa käsitellään sähköistettyjen kulkuneuvojen latausverkon eri osia ja rakennetta. Sen lisäksi tutkitaan älylatausta, millä on potentiaali suurempaan energiatehokkuuteen ja latausverkon optimoimiseen. Latausverkon olennaisin osa on itse latauspiste, mutta myös muuntajat ja erinäiset suoja-laitteet ovat olennainen osa latausverkoston infrastruktuuria. Tässä työssä latausverkolla tarkoitetaan mitä tahansa sähköverkon osaa, mikä on pääosin tai täysin tarkoitettu sähköautolle. Verkko voi olla myös kotitalouden sähköistetty autotalli, tai se voi olla esimerkiksi tehdasalueen pihan sähköverkosto. Latausverkko ei kuitenkaan sisällä varsinaista jakeluverkkoa, koska jakeluverkko sisältää muutakin sähköä siirtoa, ei vain sähköautojen latausta.

5.1 Latausverkoston komponentit

Latausverkon kenties olennaisin osa on latauslaite, eli fyysinen linkki sähköverkon ja latauspistokkeiden välillä. Tullaan huomaamaan, että ei ole välttämättä aina järkevää kytkeä latauslaitetta suoraan pienjänniteverkkoon, vaan esimerkiksi liityntä keskijännite verkkoon voi olla järkevää. Tämä liitäntä syntyy muuntajan avulla, missä jännite voidaan muuntaa sopivaan arvoon.

5.1.1 Latausasemat

Latausasemien käyttökohteet ja tekniset parametrit vaihtelevat. Täten ei ole olemassa yhtä latausasema, mikä toimisi yleisenä mallina, vaan latausasemia on tarkasteltava kokonaisuutena latausverkoston kannalta. Seuraavassa taulukossa esitellään muutamien esimerkkiasemien teknisiä parametreja ja ominaisuuksia.

Taulukko 10, Erilaisia latausasemia, [36],[37],[44]-[48].

Lataus- asema	EVC200	Terra 360	eTolppa	eTolppa	XCHAR- GEIN	Panto- graph down
Valmistaja	Ensto	ABB	harju elekter	harju elek- ter	Eaton	ABB
Käyttökohde	Kotitalou- det	Julkiset la- tausase- mat	Pysä- köinti hal- lit, yms	Kotitalou- det	Kotitalou- det	Raskaan kaluston lataus
Lataustyyppi	Luokka 3	CSS, CHA- deMO, AC, Type 2	tyyppi 2, Schuko	tyyppi 2		DC (luokka 4)
Nimellisteho kW	22	360	22	3.6	7,4/22	150–600
Latausjän- nite V	230/400	417–831*	397–794*	230	230/400	150–850
Latausvirta A	3 * 32	250–500	3*32/16	16	10–32	1000– 5667*
Latauspis- tokkeita	2	4	2	1	1	1
*ovat laskettuja arvoja						

Kuten taulukosta nähdään, latausasemien vaatimukset ja sitä kautta latausverkon vaatimukset vaihtelevat.

Esimerkiksi sähköbussin latausverkoston kytkentä ulkoiseen sähköverkkoon kannattaa tehdä eri tavalla kuin latauspisteen, mikä sisältää vain 22 kW latausasemia. Muuntajan käyttö sähköbussiverkostossa vaikuttaa järkevältä vaihtoehdolta, koska vaadittu jännite on suurempi kuin jakeluverkon jännite.

Lisäksi AC-DC tai DC-AC konvertterien käyttö voi olla tarpeellista, koska pikalataus käyttää tasajännitettä ja ulkoinen sähköverkko vaihtojännitettä. Kaapeleiden virtakestoisuus on huomioitava latausverkoston suojauksessa, varsinkin pikalatauspisteissä, jotka hyödyntävät Terra 360:n mukaisia latausratkaisuja.

5.2 Muuntajat

Muuntajat ovat tärkeä osa sähköverkkoa. Latausjärjestelmässä muuntajat korostuvat silloin, kun suurtehon latauspisteen latausverkosto liitetään osaksi muuta sähköverkkoa.

Muuntajat mahdollistavat erilaisten jännitetasojen käytön ja täten muun muassa sähköisten häviöiden vähentämisen. Tämä johtuu siitä, että sähköverkon häviöt syntyvät virran vaikutuksesta. Esimerkiksi sähköenergian häviöt (MWh) ΔA voidaan laskea lausekkeen X mukaisesti [49, s 50]:

$$\Delta A = 3R \int_0^t I^2(t) dt \quad (3)$$

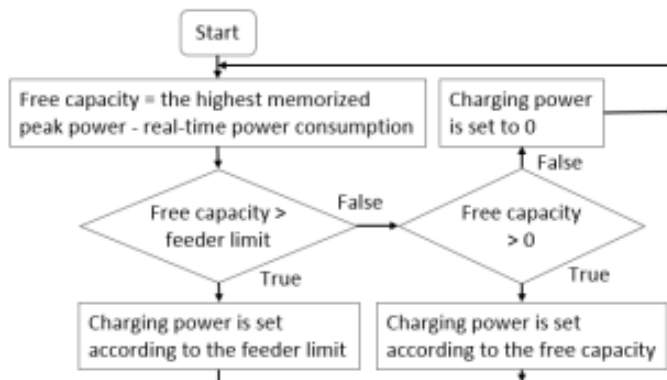
Missä I on virta ja R on johtimen resistanssi. Tämä ei ole ainoa tapa laskea sähköenergian häviötä, mutta on selvästi nähtävissä, että virta vaikuttaa olennaisesti häviöiden suuruuteen. Tästä syystä korkealla latausteholla toimivissa latausverkostoissa on järkevää nostaa erillisen muuntajan avulla jännite riittävän korkeaksi ja täten virta riittävän pieneksi. Suurin käytettävä jännite on määritettävissä latauslaitteiden maksimijännitteestä ja riippuu täten latauspisteistä. Esimerkiksi ABB:n Pantograph down latausjärjestelmän kanssa 1kV:n jännitetasoa kannattaa harkita, jos niitä on useampi pienellä alueella. Lisäksi autojen lataamisen ansiosta alueen tehontarve tulee kasvamaan. Tämä tarkoittaa sitä, että joillakin alueilla tehontarve voi lähestyä muuntajakapasiteettia ja täten on ajankohtaista nostaa vanhojen muuntajien kapasiteettia tai investoida uusiin muuntajiin.

5.3 Latausenergian mittaus

Nykyaikana sähkön mittaus tapahtuu pääasiassa etäyhteyden avulla, joko automaattisesti ja älykkäästi. Etämittauksen tarkoitus on parantaa mittaamistarkkuutta siten, että kuluttajan tarkka sähkönkulutus mitataan, lyhyiden ajanjaksojen, esimerkiksi tuntien välein. Etäluettava sähkömittari lähettää sähköyhtiölle kuluttajan sähkönkulutuksen [52]. Älykäs mittari mahdollistaa myös tehon tarkastelun [52], mikä on sähköautojen kanssa tärkeää, jotta voidaan varmistaa, että latausteho ei kasva niin suureksi, että se vahingoittaisi ympäröivää sähköverkkoa. Älylataus on erityisen hyödyllistä lataustapojen 1 ja 2 kanssa, koska lataustavan 3 ja 4 latausasemat voivat sisältää lataustehon hallintaan vaikuttavia ominaisuuksia, turvallisen lataustehon varmistamiseksi. Älylatauksen hyödyntäminen on järkevää myös lataustapojen 3 ja 4 kanssa, mutta tämä ei ole aivan välttämätöntä. Älymittaristo voi löytyä myös sähköautosta, jonka avulla kulutusta voidaan tarkastella [54, s 25].

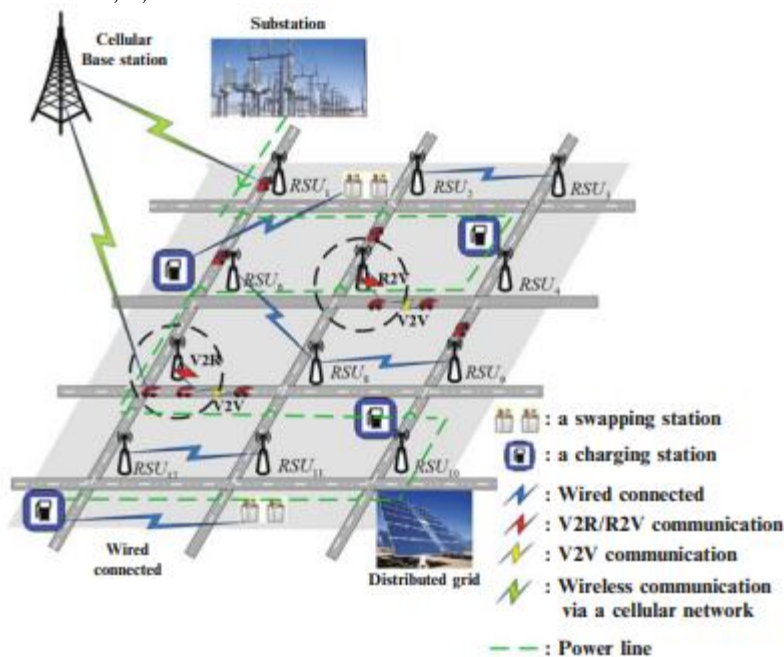
5.4 Älylataus

Älykäs lataus tarkoittaa sähköautojen tapauksessa sitä, että sähköauton latausjärjestelmä kytketään älykkääseen sähköverkkoon, antaen sille mahdollisuuden kommunikoida muiden älykkäitten sähkölaitteiden kanssa. Tämä mahdollistaa auton lataustehon hallinnan siten, että se rasittaa mahdollisimman vähän ympärillä olevaa sähköverkkoa ja pitää esimerkiksi latausvirrat ja kulutuspiikit järkevissä rajoissa. Älykäs sähköverkko mahdollistaa muun muassa kuvan 13 mukaisen latauksen hallinnan metodin [53].



Kuva 13, lataushallintajärjestelmän yksinkertaistettu kaavio, muokattu lähteestä [53].

Älykäs sähköverkko voi sisältää latausjärjestelmän ja älymittariston lisäksi V2V tiedonvälitys laitteistoa [54] ja mahdollistaa myös V2G järjestelmän. Verkko voi myös toimia langattomasti. Esimerkkinä langattomasta järjestelmästä toimii kuva 14.



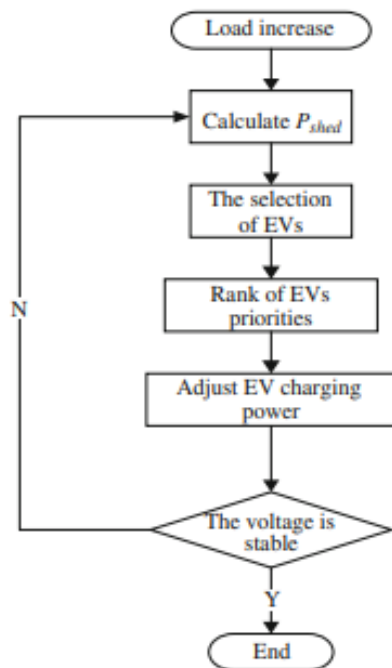
Kuva 14. langaton älykäs latausverkko, muokattu lähteestä [54, s 10]

Kuten kuvasta 14 nähdään, että älykäs latausverkosto voi olla monimutkainen järjestelmä. Se mahdollistaa kuitenkin tehokkaan sähkölatauksen hallinnan, latausjärjestelmien välisen kommunikaation ja sähköautojen hyödyntämisen sähkövarastoina.

5.5 V2G

V2G (vehicle to grid) on teknologia, minkä tavoitteena on hyödyntää sähköauton akustoa sähköverkon perspektiivistä. Tavoitteena on yhdistää suuri määrä pienen kapasiteetin omaavia sähköautojen akustoja siten, että niiden kapasiteetti on merkittävä sähköverkon kannalta [73]. V2G auttaa sähköverkkoa muutamalla eri tavalla [73]. Ensimmäinen tapa on se, että se tarjoaa sähköverkolle tavan tasoittaa sähkön kulusta siten, että sähköverkko voi käyttää sähköautojen akustoja kulutuspiikkien ja kuormien tasoitukseen. [73].

Toinen hyöty on, se että V2G:llä on lyhyt reagointiaika [73]. Tämä parantaa sähköverkon reagointikykyä ongelma tilanteissa. V2G on myös mahdollinen työkalu jännitteen vakauden ylläpitämisessä. Tällöin on mahdollista käyttää kuvan 15 mukaista algoritmia, missä sähköauton lataus-tehoa säädelään siten, että jännitteen arvo pysyy sallituissa rajoissa.



Kuva 15, jännitteen hallinta algoritmi [51].

6 Energiantarpeen vaikutukset

Tämä luku käsittelee sähköistettyjen kulkuneuvojen lataamiseen tarvittavan energian vaikutusta, erityisesti sähköverkon kannalta. Energia toimii yläterminä, mutta kappale käsittelee myös lataustehon ja sähkön laadun vaikutuksia. Sähkön laadulla tarkoitetaan virran ja jännitteen aaltomuotojen vaihtelua, virran ja jännitteen hetkellistä vaihtelua ja loistehon vaikutuksia. Luku jakautuu kolmeen vaikutusalueeseen. Nämä osat ovat tuotanto, sähköverkko ja asuinalueet. Jokaisella alueella käsitellään alueen kannalta olennaisia sähkölatauksen vaikutuksia, ja täten osa-alueet vaihtelevat riippuen tarkastelukohteesta.

6.1 Sähkön tuotanto ja sähkömarkkinat

Tässä alaluvussa käsitellään sähköistettyjen kulkuneuvojen ja niiden latauspisteiden vaikutusta sähkön tuotantoon ja markkinoihin. Lisäksi vaikutukset siirtoverkon kannalta kuuluvat tähän alalukuun, koska kyseinen verkko on tärkeä sähköntuotannon kannalta.

6.1.1 Tuotanto

Vaikka sähköautojen vaatima tehotarve on pieni, onko silti mahdollista, että sähkö ei riitä, varsinkin jos osa voimaloista on poissa sähköverkosta? Erittäin epätodennäköisiä tilanteita huomioimatta, missä useampi sähkövoimala kytkeytyy samanaikaisesti pois verkosta, ja sähkön siirto naapurimaista ei onnistu, on vaikea uskoa, että sähköautojen energiantarpeesta johtuen maan sähköverkon kapasiteetti ylittyisi.

Kuten luvussa 4 on laskettu, henkilöautojen energiantarve tulee olemaan muutaman prosentin koko Suomen energian kulutuksesta, ja sama tulee koskemaan julkista ja raskasta liikennettä. Täten liikenteen sähköistymisen energiantarve ei tule kattamaan suurta osaa Suomen energiantarpeesta, ja sen vaikutukset ovat hallittavissa. Varsinkin, jos Olkiluoto 3:n sähköntuotanto käynnistyy vuoden 2022 helmikuussa [55], minkä tuottama teho on noin 14 % kansallisesta energiantarpeesta [55]. Täten Olkiluoto 3 kattaa käytännössä sähköisen liikenteen vaatiman energian.

Entä kestäkö Suomen siirtoverkko energiantarpeen muutoksen. Todennäköisesti kyllä, koska latausteho suhteessa kokonaiskulutukseen on pieni. Lisäturvana on se, että Fingrid aloitti vuonna 2015 kymmenen vuoden kestäväen kantaverkkovahvistuksen, jonka budjetti on noin 1.2 miljardia euroa [56]. Tämän tavoitteena on muun muassa kestävä kasvava sähköntuotanto [56], joten en vaikea kuvitella, että sähköistetyistä liikenteestä tulisi kantaverkolle ongelma.

6.1.2 Sähkömarkkinat

Jos sähköautojen kulutuksen mallintaminen onnistuu helposti ja tarkasti, ei niiden lisääntyminen tule sähkömarkkinoille ongelmaksi, varsinkin kun energiantarpeen kasvu vain lisää myyntiä. Lisäksi V2G periaate voi lisätä taajuusreserveille uusia mahdollisuuksia. Tietenkin V2G:n hyödyntäminen on hankalaa ja tulee vaatimaan selvät säännöt ja lait, mutta lopputuloksena voisi olla uusi potentiaalinen tapa toteuttaa sähkön varastointia ja taajuudenhallintaa.

6.2 Sähköverkko

Tässä aluvussa käsitellään latauspisteiden ja sähköajoneuvojen vaikutusta ympäröivään sähköverkkoon, eli käytännössä pien- ja keskijänniteverkkoon. Kuten on jo aikaisemmin todettu, sähköautoja voidaan ladata pienjännitteisen jakeluverkon kautta, riippuen latauspisteen tehosta. Täten lataamisen vaikutus näkyy pääosin tämän aluvun kohdalla käsiteltävissä verkoissa. Nämä ovat myös niitä verkkoja, missä mahdolliset pullonkaulailmiöt voivat esiintyä. Kuten kappaleessa 5 on todettu, niin osa latausasemista vaativat kuitenkin suuremman kuin 400 V jännitteen. Täten korkea tehoiset latauspisteet, esimerkiksi pikalatauspisteet, on kytkettävä joko suoraan keskijänniteverkkoon tai on käytettävä 1 kV:n verkostoa. Tämä tuottaa luonnollisesti lisäkustannuksia pikalatauspisteiden rakennuttajalle.

6.2.1 Kulutushuiput

Kuten työssä on aikaisemmin tuotu esiin, ei sähköautojen vaatima energia tule tuottamaan Suomelle suuria ongelmia. Riski on kuitenkin se, että kun hetkellinen tehotarve on suuri, ja suurta määrää autoja ladataan paljon samanaikaisesti suuritehoisella latauksella, niin verkon kapasiteetin rajat lähestyvät. Tämä voi tuottaa ongelmia sähköverkossa, varsinkin lataustarpeeseen heikosti varautuneilla alueilla. Autojen määrä kunnittain on vaihdellut ja tulee vaihtelemaan, mutta Suomessa oli (2018) 329–718 autoa tuhatta asiakasta kohti, kunnittain riippuen [57]. Toinen huomattava asia on virtapiikkien kasvu. Sähköyhtiöiden täytyy varautua siihen, että johtimien virrankesto on riittävällä tasolla virrankesto riittää ja releet eivät turhaan aktivoidu.

Kulutuspiikit selvästi määrittävät rajoituksia alueen sähköverkolle. Jotta voidaan tarkastella mahdollista kaupunkikohtaista kulutusta, niin pitää selvittää, mikä on tarkasteltavan kaupungin suhteellinen osuus henkilöautoista. Tässä työssä oletetaan, että aluekohtainen suhde ei suuresti muutu ja, että sähköautot leviävät tasaisesti. Tässä syntyy pieni virhearvio, koska se ei ota huomioon, että sähköautot ovat yleisesti kalliimpia ja ne pääosin soveltuvat kaupunkikäyttöön. Tarkat henkilöautomäärät on saatu Traficom:in ja tilastokeskuksen tuottamasta tieliikennekäyttöisten ajoneuvojen tutkimuksesta 30.6.2021, tilasto löytyy lähteestä [50]. Työssä käsitellään vain muutamaa kaupunkia esimerkin vuoksi. Ajoneuvosuhde kuvaa kaupungin henkilöautojen määrää suhteessa koko Suomen henkilöautokantaan.

Taulukko 11, Kaupunki kohtaisia ajoneuvosuhteita ja teoreettisia sähköautomääriä

Kaupunki	Henkilöauto-määrä	Ajoneuvosuhde	Sähköautojen määrä
Tampere	100689	3,56 %	24897
Kotka	27089	0,96 %	6698
Oulu	97931	3,46 %	24215
Lahti	58639	2,07 %	14499
Jyväskylä	66046	2,33 %	16340

Taulukosta 12 saadaan seuraavat tulokset sähköautojen aiheuttamista kulutuspiikeistä, eri latausprosentteille. Latausprosentti kuvaa seuraavassa taulukossa sitä, miten montaa sähköautoa ladataan samaan aikaan suhteessa sähköautojen kokonaismäärään. ”

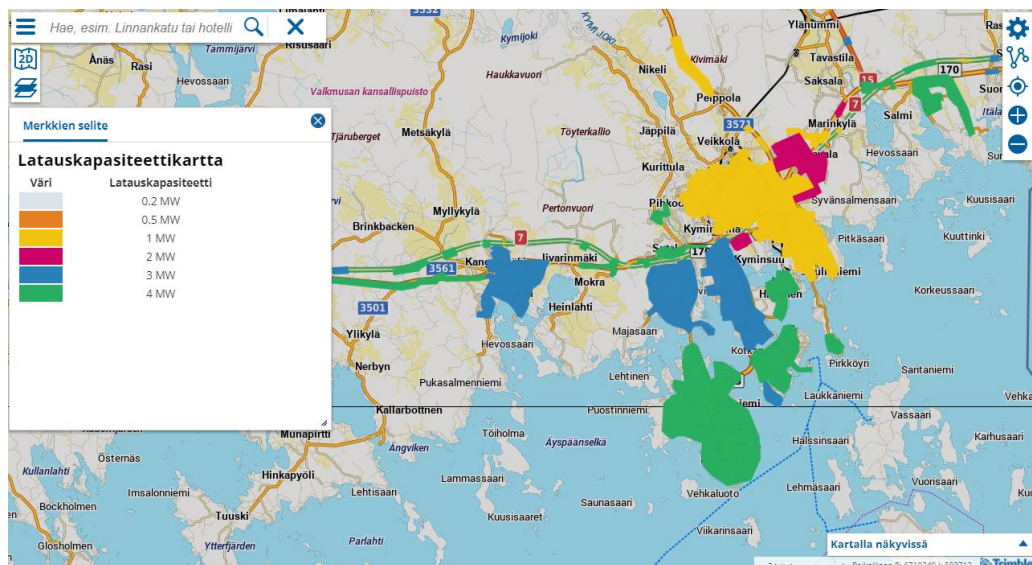
Taulukko 12, Kaupunkien kulutuspiikkejä eri latausprosentteilla.

Lataus-teho (kW)	11,5	11,5	3,6	3,6	3,6	3,6
Lataus-prosentti	20 %	40 %	20 %	40 %	60 %	80 %
Energian kulutus (MWh)						
Tampere	57,26	114,52	17,93	35,85	53,78	71,70
Kotka	15,41	30,81	4,82	9,65	14,47	19,29
Oulu	55,69	111,39	17,44	34,87	52,3	69,74
Lahti	33,35	66,70	10,44	20,88	31,32	41,76
Jyväskylä	37,58	75,16	11,76	23,53	53,29	47,06

Tästä nähdään, että latausteho voi kasvaa hetkittäisesti suureksi jo pienellä latausteholla. Jos verrataan Kotkan nykyiseen latausverkostoon, kuva 16, niin nähdään, että Kotkan alue sisältää noin 10 MW lataustehoa. Täten jos 20 % kaikista Kotkan alueen sähköautoista latautuisi julkisilla latausmenetelmillä samanaikaisesti, niin Kotkan alueen latauskapasiteetin rajat ylitettäisiin. Koska kartta ei ota huomioon kotitalouksissa tapahtuvaa sähköauton latausta, niin kapasiteetin rajat eivät todennäköisesti rikkoudu. Jos pikalataus asemien määrä kasvaa voimakkaasti, niin voi sähköautojen lataaminen tuottaa kuitenkin suuria kulutuspiikkejä.

Hetkellistä tehontarvetta ja paikallisia kapasiteetti rajoja voidaan tarkastella myös seuraavasti. Lähteen 57 mukaan Kotkassa on noin 550–575 autoa tuhatta asukasta kohden ja jos oletetaan, että suhde olisi 550/1000, niin täten Kotkan 51 668:n [58] väkiluku vastaa noin 28 417 henkilöautoa. Jos näistä kolmasosa olisi sähköautoja, niin Kotkassa olisi täten 9472 sähköautoa.

Jos sähköautoista 947, noin 10 % autoista, lataisi samaan aikaan julkisilla latauspisteillä luokan kolme mukaisesti ja käyttäisi 10.5 kW lataustehoa, niin latausteho olisi noin 10 MW. Jos verrataan lataustehon tarvetta Kotkan seudun valmiin latauskapasiteetin karttaan, kuva 16, niin nähdään, että latausverkko olisi erittäin lähellä maksimikapasiteettiaan. Jos lähes kaikki 10000 autoa ladattaisiin samanaikaisesti, samalla teholla, niin latausteho nousisi noin 99 megawattiin. Tietenkin tilanne on hieman epärealistinen, mutta ei täysin mahdoton.



Kuva 16, kotkan latausverkko, muokattu lähteestä 59.

6.2.2 Virran vaikutus johtoihin

Sähköautojen latausvirta rajoittaa myös latausverkostojen suunnittelua. Tämä johtuu siitä, että lisääntynyt hetkittäinen teho voi nostaa sähkövirtaa yllättävä paljon, varsinkin pikalatauksessa. Riski syntyy pääosin johtojen lämpenemisessä, mutta myös vikatilanteet ovat tärkeitä ottaa huomioon.

Johtimen lämpenemä voidaan laskea lausekkeella 4, [60].

$$\Delta T = \frac{I^2 r}{a\alpha} \quad (5)$$

Lausekkeessa I on johtimen virta, r on johtimen resistanssi, a on pinta-ala ja α on pinnan lämpösiirtokerroin. Lausekkeesta nähdään, että lämpötila riippuu virran neliöstä, eli jos virta nousee 90 ampeerista 120 ampeeriin, niin lämpenemä kasvaa noin 1.77 kertaiseksi.

Jos latausasema käyttää samaan aikaan sekä pikalatausta että hitaampaa latausta, pitää aseman joko liittyä sähköverkon ja mahdollisesti muuntajaan joko kahden eri kaapelin avulla tai kaapeli mitoittaa pikalatausta varten. Jos pikalatauksen teho on 350 kW ja se toimii 20 kV:n jännitteellä, niin latausvirta on 17.5 Ampeeria, mutta jos latauspiste toimii 1 kV:n jännitteellä, niin täten latausvirta on 350 A. Pikalatauksen yhteydessä täytyy jännitteen olla korkea, jotta johdin ei liikaa kuumene.

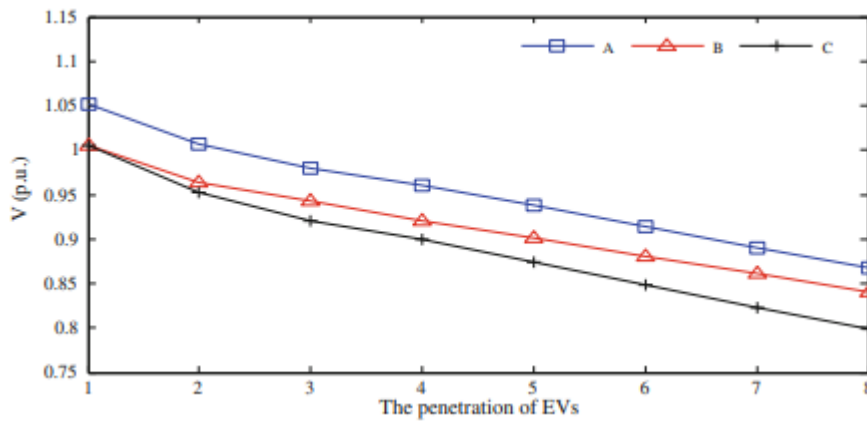
Latausjohtimissa, ja varsinkin liitosjohtimissa on tärkeää ottaa huomioon sähkövirran tuomat ongelmat. Tämä nostaa tietenkin kustannuksia ja on huomioitava latausverkoston suunnittelussa.

6.2.3 Sähkön laatu

Sähkön laadulla tarkoitetaan sähkön aaltomuodon vaihteluita ja olotilaa, suhteessa odotettavissa olevaan normaaliin. Sähkön laatu on yläkäsite, mikä sisältää alakäsitteitä, esimerkiksi:

1. Jännitteen vaihtelu
2. Harmoninen yliaalto
3. Taajuus
4. Epäsymmetria
5. Välkyntä

SFS-EN 50160 määrittelee jokaiselle eri alakäsitteelle tarkat ylä- ja alarajat. Jännitteen vaihtelulla tarkoitetaan sähköisen aallon amplitudin vaihtelua. Liian suuri tehontarve voi esimerkiksi laskea jännitettä ja suuri samanaikainen sähköautojen lataus voi mahdollisesti tuottaa hetkellisiä jännitekuoppia, jos latausteho kasvaa mitoitettua suuremmaksi. Tämä voi olla ongelma esimerkiksi pienissä jakeluverkoissa [69], missä sähköautot korvaavat suuren osan autokannasta. Tätä on tutkittu muun muassa UK:ssa missä on todettu, että jos sähköautot ovat 50–100 % autokannasta, niin sähköverkon päässä jänniterajat ylitetään [69]. Jännitteen lasku nähdään myös kuvasta 17, missä A, B, C kuvaavat eri sähköautojen penetraatiolukuja. [51]. Penetraatio tarkoittaa sitä, miten suuri osa autokannasta on sähköautoja, joita käytetään latauksessa, A on 20 %, b 40 % ja C 60 %. X akselilta löytyy sähköverkon eri solmupisteitä.



Kuva 17, Verkon jännitteen muutos eri solmupisteissä, suhteessa sähköautojen penetraatioon

Kuvasta 17 nähdään selvästi, että suuri määrä sähköautoja sähköverkossa voi aiheuttaa vakavankin jännite laskun, jos sähköautojen latausta ei hallita oikein ja jos sähköverkko ei ole varautunut jännitteen laskuun.

Harmoniset yliaallot tarkoittavat sitä, että sähköverkkoon syntyy jänniteitä, joiden taajuus on monikertainen suhteessa normaaliin sähkönsiirtoon. Harmoniset yliaallot voivat tuottaa ongelmia siirto-verkoissa. Hieman vastaava ongelma on taajuuden vaihtelu. Eurooppalaisissa sähköverkoissa taajuus on 50 Hz. Taajuuden ylläpito on tärkeää, koska sen suuri muutos vaikuttaa negatiivisesti sähkölaitteisiin, kuten vaihtovirtamoottoreihin ja generaattoreihin. Viimeinen huomioon otettava asia on jännitteen tai virran epäsymmetria, sekä jännitteen välkyntä. Epäsymmetria tarkoittaa yksinkertaisesti sitä, että sähkö ei ole symmetristä vaihejohtimien kesken. Vastaava ongelma voi syntyä, jos esimerkiksi kotitalous lataa sähköautoa vain yhdellä vaiheella ja muiden vaiheiden kulutus on olematonta. Täten verkossa on käytettävä erillistä hallintalaitetta epäsymmetrian korjaamiseksi, hallintalaitteiston tärkeys nähdään kuvasta 19. Jännitteen välkyntä tarkoittaa sitä, että jännitteen voimakkuus vaihtelee paljon lyhyessä ajassa. Tämä näkyy esimerkiksi valaistuksen voimakkuuden nopeana vaihteluna tai jopa lamppujen valaistuksen nopeana sammumisena ja uudelleen kytkeytymisenä.

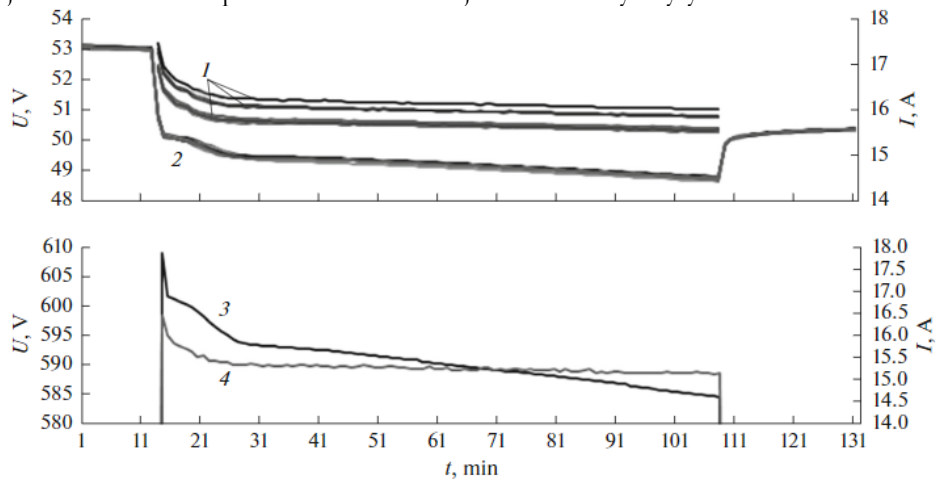
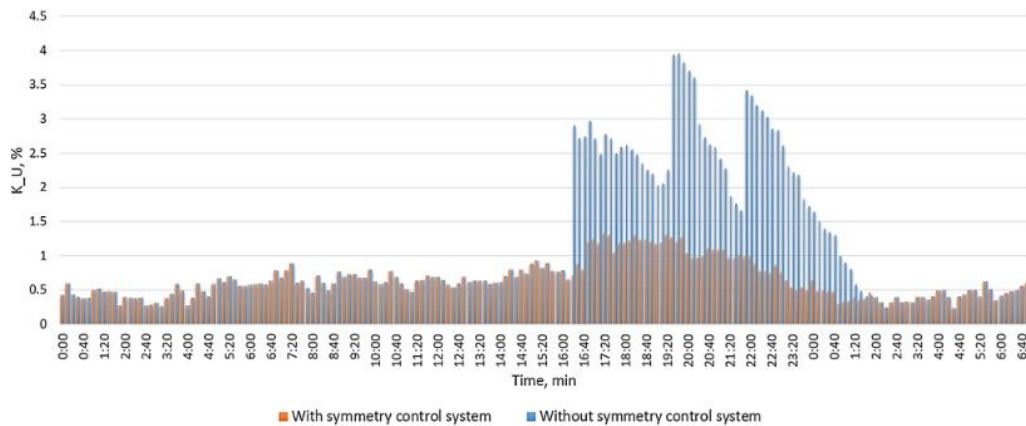


Fig. 3. Discharge voltage and current in the course of test trials: (1) discharge current for each of 12 B groups; (2) voltage for each of 12 B groups; (3) voltage of 12 B groups connected in series; (4) discharge current of 12 B groups connected in series.

Kuva 18, julkisen liikenteen latausjännite ja virta lähteen [61, s 165] testien tuloksena.

Kuten kuvasta 18 nähdään, voi latausjärjestelmä käynnistyessään aiheuttaa jännitepiikin, joka voi raittaa sähköverkkoa. Kuvassa 13 kohdat 1 ja 4 kuvaavat purkuvirtoja, kun taas kohdat 2 ja 3 kuvaavat purkujännitettä. Ylin kuvaajista kuvaa tutkimuksessa käytetyn tutkimusautosarjan yksittäisen auton latausarvoja, taas kuin alempi kuvaaja kuvaa koko sarjaa [61]. Latausverkkoa suunniteltaessa on otettava huomioon mahdolliset jännitepiikit, sekä latausjännitteen vaihtelu ajan kanssa.



Kuva 19, mitattu latausjännite, latausjärjestelmän kanssa ja ilman, kun alueella on 35 % autoista on sähköautoja [62, s 11].

Harmoniset yliaallot voivat johtua sähköauton latauksesta, varsinkin pikalatauksesta. Tämä on tutkittu paljon, ja tulokset riippuvat hieman tarkastelupisteistä. Yleisesti ottaen pikalataus ei tuota suurta määrää harmonisia yliaaltoja, mutta varsinkin suuremmat suuremman asteen yliaallot, esimerkiksi 13 ja 25 asteen yliaallot voivat kasvaa liian suuriksi. Tätä on tutkittu muun muassa tutkimuksessa Grid harmonic impact of multiple electric vehicle fast charging [70]. Tämän mukaan yliaallot olivat pääosin standardien IEEE 519 ja SFS-EN 61000 määrittämässä rajoissa, mutta osa yksittäisistä yliaalto komponenteista ylitti rajat. Tutkimus ja useat muut lähteet [70, katso 6–11] mainitsevat kuitenkin, että pienellä latausteholla normaalisti ladattavat sähköautot eivät aiheuta haitallisten suurien harmonisia yliaaltoja. Kuitenkin ja jos ladattavien sähköautojen määrä kasvaa, niin latausvirta nousee, mikä voi aiheuttaa harmonisia yliaaltoja [70, s 20]. Lämpötilalla on myös merkitystä harmonisten yliaaltojen kannalta. Tämä huomataan tutkimuksessa Power Quality Performance and Fast-Charging under Extreme Temperature conditions [71]. Tutkimuksen mukaan jo -15 C lämpötilassa osassa tutkimuksen pikalatauspisteistä harmoniset kokonaisrajat ja 3. yliaalto rajat ylittyivät. Lisäksi alle -25 C lämpötilassa joksaisessa pikalatauspisteessä rajat ylittyivät.

Sähköautojen vaikutus sähkön laatuun on tärkeä tarkastelukohde, koska sähkön laatu on olennainen osa nykyajan yhteiskunnan laitteiden luotettavuutta ja toimintaa. Jotta sähkölaadun vaikutuksen voidaan pitää kaikille miellyttävänä, on olennaista tutkia, miten eri muuttujat, kuten sähköautot siihen vaikuttavat. Fingridin mukaan tilanne on kuitenkin nykyhetkellä hyvä [40]. On tärkeää huomata, että paikoittainen sähkön laatu voi olla sähköautojen johdosta huonompi ja sähköautojen määrän kasvu varmasti lisää vaikutuksia sähkön laatuun.

6.3 Yritykset ja asuminen

Tässä kappaleessa käsitellään latausverkon vaikutuksia ja vaatimuksia erilaisten asuinalueiden ja parkkialue ratkaisujen kannalta. Tarkoitus on liittää sähköauton käyttäjä ja jakeluverkko siten, että ne muodostavat yhtenäisen kokonaisuuden sähköistettyjen ajoneuvojen ja niiden vaikutusten kannalta. Sähköautojen latauspaikat ovat erilaisia, ja täten mahdollistavat eri lataustyilien hyödyntämisen, mutta tuovat samalla omat haasteensa infrastruktuurin rakentamiseen. Tämä kappale tarkastelee, sekä asuinalueiden latauspaikojen, niin myös yritysten ja julkisten latauspakkojen ratkaisuja.

6.3.1 Asuinalueiden parkkipaikat

Asuinalue jakautuu kahteen eri alakäsitteeseen, omakotialueeseen ja kerrostaloalueeseen. Molempien latausratkaisut eroavat hieman toisistaan. Omakotitaloalueella voidaan olettaa, että jokaisella sähköauton käyttäjällä on oma latauspiste, mikä on luokaltaan vähintään 1. Kerrostaloalueen latauspisteet eivät taas välttämättä korreloi sähköautojen määrän kanssa ja täten latauspiste on useammin käytössä. Se voi kuitenkin kuulua erilliseen sähköverkkoon tai liittyä jakeluverkkoon eri liitospisteestä, kuin muu sähkönkäyttö.

Kuten luvun neljä latauskäyrästä nähdään, sähköauton lataus ei jakaannu tasaisesti, vaan se muodostaa kulutuspiikin, jonka voimakkuus riippuu hieman lataustehosta. Täten kotitalouksien ja varsinkin kerrostalojen sähköverkkojen on varauduttava siihen, että sähköauton latauspiikit eivät rasita liiallisesti sähköverkkoa. Tietenkin ajastetun latauksen avulla on mahdollista ladata autoa silloin, kun sähköverkko ei muuten rasitu, mutta silloinkin latausteho on otettava huomioon. Tämä johtaa myös siihen, että sähköautoa ei kannata ladata suoraan pistorasiasta, vaan luokkaa 2 tai 3 on järkevämpää käyttää, koska nopeamman latauksen lisäksi ne mahdollistavat latausenergia hallinnan, ja täten ajastimen käytön.

Latausverkon mahdollinen uudistaminen tai uudelleenrakentaminen ei ole tietenkään helppoa ja ilmaista. Verkon vaatimuksia voidaan arvioida taulukon 4 mukaisella latauspisteiden minimimäärällä. Lisä arviota voidaan tehdä hyödyntämällä luvun neljä käyrästä tutkimalla asuinalueiden sähköautojen lataustehoja. Nämä tarkoittavat sitä, että asunto-osakeyhtiöiden on suunniteltava huolellisesti oma latausverkostoratkaisunsa, jotta kulutus voidaan pitää minimissä ja teho riittää. Sähköautot vaikuttavat rahallisesti täten myös asuinalueiden budjetointiin.

6.3.2 Yritysten ja teollisuuden asuinalueiden latauspaikat

Sähköautojen lisääntyminen tarkoittaa vastaavia lisääntyviä mahdollisuuksia, mutta myös ongelmia, yrityksille, kuin asunto-osakeyhtiöillekin. Koska on todennäköisempää, että ihmiset lataavat sähköautonsa kotona, on energiankulutus mahdollisesti pienempi yritysten sähkölatauspaikoilla. Taulukon 4 mukaiset vaatimukset koskevat kuitenkin myös teollisuuden latauspaikkoja, joten latausverkon suunnittelu on silti tarpeen. Kulutuspiikit ovat silti mahdollisia, joten verkon kestävyys on otettava huomioon myös suunnittelussa. Johtuen siitä, että pikalataus on mahdollinen vaihtoehto teollisuuden ja esimerkiksi suurten yritystenparkkipaikoilla, niin latausverkon kytkemistä suurempaan kuin 0,4 kV jännitetasoon tulee harkita. Täten kulutuspiikkien vaikutus korostuu pikalatauksen myötä.

6.3.3 Julkiset alueet

Julkisilla alueilla tarkoitetaan tässä latauspaikkoja, mitkä ovat kaikille saatavissa. Tämä sisältävät latauspisteet erillisistä latausasemista valtion rakennusten, kuten kirjastojen, parkkialueisiin. Näihin alueisiin pikalatauspaikat sopivat hyvin ja täten liitäntä suuremman jännitetason verkkoon voi olla kannattavaa. Ongelmat ovat vastaavia kuin asuntoalueillakin ja teollisuudessa, eli latausverkon suunnittelussa on otettavat huomioon, sekä kulutuspiikit että sähkölaitteiden kestävyys. Lisäksi huomioon otettavia asioita ovat sähkön laadun ja latausenergian hallinta.

7. Yhteenveto

Työn tarkoituksena on tutkia miten sähköistettyjen kulkuneuvojen latauksen vaikutusta. Työssä tarkastelu kohteina olivat sähköiset henkilöautot niin sähköistettyihin kuorma autoihin asti. Lisäksi työ avasi sähköautojen ja sen lataamisen perusteita. Myöskin latausinfrastruktuuria ja sen rakennetta on työn aikana tutkittu. Työn tuloksena huomattiin, että latausenergiantarve ei tule merkittävästi vaikuttamaan, mutta sähkön laatu, erityisesti jännitteen epäsymmetria, voi olla kriittinen tekijä. On olennaista kuitenkin varmistaa, että latauslaitteisto on riittävästi ja että erinäisiä pullonkaula ilmiöitä ei synny. Tämä johtuu siitä, että yksittäisellä alueella voi olla hetkellisesti niin suuri latausteho, että paikallisen latausverkosto kapasiteettiraja lähestyy. Tämä johtuu pääosin siitä, että autoja ei ladata tasaisesti. Lisäksi älymittarien mahdollistama V2G tuo uusia mahdollisuuksia paikallisille sähköyhtiöille.

LÄHTEET

- [1] Jesse Suosalmi, sähköautojen julkiset latausratkaisut haja-asutus alueilla viitattu 25.10.2021, saatavilla: https://aaltodoc.aalto.fi/bitstream/handle/123456789/103120/master_Suosalmi_Jesse_2021.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [2] Mary Bellis, The History of Electric vehicles Began in 1830, ThoughtCo, viitattu 25.10.2021, saatavilla: <https://www.thoughtco.com/history-of-electric-vehicles-1991603>
- [3] Mary Bellis, History of the Automobile: The Assembly Line, ThoughtCo, viitattu 25.10.2021, saatavilla: <https://www.thoughtco.com/history-of-car-assembly-line-4072559>
- [4] Euroopan unionin AFID direktiivi, viitattu 12.9.2021, saatavilla: https://www.eca.europa.eu/Lists/ECADocuments/SR21_05/SR_Electrical_charging_infrastructure_FI.pdf
- [5] Sesko Ev-charging standards_may2016 [Compatibility Mode], viitattu 26.10, saatavilla: https://www.sesko.fi/files/671/EV-charging_standards_may2016_Compatibility_Mode_.pdf
- [6] Per Enge, et al, Electric Vehicle Engineering, kirja, julkaistu; 2021, McGraw Hill, saatavilla: <https://www-accessengineeringlibrary-com.lib-proxy.tuni.fi/contwwent/book/9781260464078>, ISBN: 9781260464078
- [7] Sesko, Lataussuositus 2019, diasarja, viitattu 24.11.2021, saatavissa: https://www.sesko.fi/files/1098/Lataussuositus_2019_2019-05-27.pdf
- [8] Maurizio Di Paolo Emilio, Wireless Charing Technology for EVs, Power Electronics News, viitattu 26.10, saatavilla: <https://www.powerelectronicsnews.com/wireless-charging-technology-for-evs/>
- [9] ABB, Industrial plugs and sockets, viitattu 26.10.2021, saatavilla: <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=2CMC700050B0001&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>
- [10] Worldstandards, Power plug & outlet Type F, viitattu 26.10, saatavilla: <https://www.worldstandards.eu/electricity/plugs-and-sockets/ff/>
- [11] Antti Rautainen, Electric vehicles in power systems, viitattu 26.20.2021, saatavilla: <https://moodle.tuni.fi> > DEE-230030-2020-2021-1 Sähkömarkkinat (Luento-opetus) > Vierailuluento – Antti Rautainen, Pohjois-Karjalan Sähkö Oy > Sähköinen liikenne osana sähköjärjestelmää
- [12] Anti Laalahti, Sähköautojen kotitalouksien vaikutukset sähkönjakeluverkoston jännitteen laatuun, Diplomityö, viitattu 26.10.2021, saatavilla: <https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/123456789/27606/Laalahti.pdf?sequence=4&isAllowed=y>
- [13] Mark Kane, Repsol Launches The Most Powerful Charging station in Europe: 400 kW, INSIDEEVs, viitattu 26.20.2021, saatavilla: <https://insideevs.com/news/375020/repsol-most-powerful-charging-station-europe/>
- [14] Motiva, Akut, viitattu 24.10, saatavissa: https://www.motiva.fi/ratkaisut/kestava_liikenne_ja_liikkuminen/nain_liikut_viisaasti/valitse_auto_viisaasti/ajoneuvotekniikka/akut
- [15] Miro Niemi, Sähköajoneuvojen akusto ja kestoikä, Amk, viitattu 24.10.2016, saatavilla: https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/110056/Niemi_Miro.pdf 24.10

- [16] Nissan 2022 Nissan Leaf: n esittelysivusto, viitattu 26.10.2021, saatavilla: <https://www.nissanusa.com/vehicles/electric-cars/leaf/features/range-charging-battery.html>
- [17] Patrick Caughill, Take an In-Depth Look at the Tesla Model 3's New Battery Pack Architecture, Futurism, viitattu 26.20.2021, saatavilla: <https://futurism.com/take-an-in-depth-look-at-the-tesla-model-3s-new-battery-pack-architecture>
- [18] Hyundai, Hyundai Kona Electric esittelysivusto, viitattu 24.9.2021, saatavilla: <https://www.hyundai.fi/mallisto/kona-electric/>
- [19] Volkswagen, technical data of the ID.4, viitattu 27.9.2021, saatavilla: <https://www.volkswagen-newsroom.com/en/the-new-id4-from-volkswagen-media-drive-6697/technical-data-of-the-id4-6712>
- [20] Teemu Granström, Näistä syistä sähkö voittaa dieselin – Suomen suurin sähköbussilavasto aloittaa liikennöinnin, autotalli.com, viitattu 24.9.2021, saatavilla: <https://www.autotalli.com/artikkeli/naista-syista-sahko-voittaa-dieselin---suomen-suurin-sahkobussilavasto-aloittaa-liikennoinnin>
- [21] Joni Markkuala & Olli Vilppo, Tampereen bussiliikenteen sähköistäminen, viitattu 29.9.2021, saatavilla: https://www.tampere.fi/tiedostot/t/W0CdNZVvf/bussiliikenteen_sahkoistaminen_tauastaselvitys.pdf
- [22] Euroopan unionin cleanbus aloite, viitattu 12.9.2021, saatavilla: https://ec.europa.eu/transport/themes/urban/cleanbus_fi
- [23] IEC TC 69 electrical power/energy systems for electrically propelled road vehicles and industrial trucks, standardi, viitattu 26.20.2021, saatavilla: <https://standards.iteh.ai/catalog/tc/iec/8839f272-fefd-4937-8141-e43b5568cb5c/tc-69>
- [24] Sesko, Sähköajoneuvojen lataussuositus 2021, 5 painos, viitattu 26.10.2021, saatavilla: https://www.sesko.fi/standardit/standardoinnin_aihealueita/sahkoautot_ja_latausjarjestelmat/lataussuositus
- [25] Eduskunnan vastaus sähköajoneuvojen latauspisteisiin liittyen, 2014/94/EU, viitattu 12.9.2021, saatavilla: https://www.eduskunta.fi/FI/vaski/EduskunnanVastaus/Sivut/EV_108+2020.aspx
- [26] Katri Pelkonen, Asiakastytyväisyystutkimus varkauden prismasta, viitattu 26.10, saatavilla: https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/14635/Katri_Pelkonen.pdf?sequence=1
- [27] Hyundai, Hyundai Kona Electric esittelysivusto, viitattu 24.9.2021, saatavilla: <https://www.hyundai.fi/mallisto/kona-electric/>
- [28] Tesla, Tesla Model 3 esittelysivusto, viitattu 24.9.2021, saatavilla: https://www.tesla.com/fi_fi/model3/design#overview
- [29] Autoalan tiedostuskeskus, Autojen keskimääräiset hinnat suomessa, viitattu 24.9.2021, saatavilla: https://www.aut.fi/etusivu_vanha/tilastot/verotus_ja_hintakehitys/autojen_keskihintatilastoja
- [30] Nissan, Nissan leaf myyntisivusto, viitattu 4.12.221, saatavilla: <https://www.nissanusa.com/shopping-tools/build-price?models=nissan-leaf>
- [32] Traficom, Henkilöliikennetutkimuksen 2016 tuloksia taulukoina, viitattu 29.9.2021, saatavilla: <https://www.traficom.fi/fi/ajankohtaista/julkaisut/henkiloliikennetutkimuksen-2016-tuloksia-tilukoina?toggle=Yleiskuva%20liikkumisesta>

- [33] Niklas Jakobsson, et al, Are multi-car households better suited for battery electric vehicles? – Driving patterns and economics in Sweden and Germany, volume 65, ScienceDirect, viitattu 24.9.2021, saatavilla: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0968090X16000371>
- [34] Saara Jääskeläinen, Fossiilittoman liikenteen tiekartta, Liikenne ja viestintäministeriö, viitattu 29.9.2021, saatavilla: <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-243-588-0>, ISBN 978-952-243-588-0
- [35] Fingrid, Sähkön kulutus ja tuotanto, avoin data, viitattu 17.11.2021, saatavilla: <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/sahkomarkkinainformaatio/kulutus-ja-tuotanto/>
- [36] ABB, Never stop moving, viitattu 23.20.2021, saatavilla: <https://new.abb.com/ev-charging/terra-360>
- [37] ABB, Pantograph down for electric buses, viitattu 23.20.2021, saatavilla: <https://new.abb.com/ev-charging/products/pantograph-down>
- [38] Liu Zhaoxi, et al, Day-Ahead Energy Planning With 100% Electric Vehicle Penetration in the Nordic Region by 2050, Scholarly Journal, ProQuest, viitattu 15.10.2021, saatavilla: <https://www.proquest.com/docview/1537068732?accountid=14242&pq-origsite=primo>
- [39] HSL, Sähköbussi nousee päästötavoitteittemme ykkösketjuun, viitattu 29.9.2021, saatavilla: <https://www.hsl.fi/hsl/sahkobussit>
- [40] Jonne Jäppinen, Fingridin haastattelu, Fingrid oy, viitattu 25.11.2021
- [41] Ebusco, Ebusco 2.2 esittelysivusto, viitattu 9.12.2021, saatavilla: <https://www.ebusco.com/electric-buses/ebusco-2-2/>
- [42] Aleksandr Chernykh, Data analysis of electrical energy consumption of electric buses, Diplomityo, Tampereen yliopisto, viitattu, 29.9.2021, saatavilla: <https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/10024/117215/ChernykhAleksandr.pdf?sequence=2&isAllowed=y>
- [43] Tilastokeskus, Tieliikenteen suoritelaskenta 2018, viitattu 29.9.2021, saatavilla: https://vayla.fi/documents/25230764/0/Raportti_tieliikenteen_suoritelaskenta_2018.pdf/4079997f-549e-4f99-b2cd-e697681a371c
- [44] Ensto, Chago pro ja Chago Premiun EVF200/100 ja EVC200/100, datasheet, viitattu 23.20.2021, saatavilla: https://www.ensto.com/files/documents/datasheet/Solutions/EVF_EVC_200_FI.pdf
- [45] Harju Elekter 8MMO15313, viitattu 23.10.2021, saatavilla: <https://shop.harjuelekter.fi/Latausasema-2-22kW-3-32A-Type/ekauppa/p8MMO15313/>
- [46] Harju Elekter 8MMO3105L, viitattu 23.10.2021, saatavilla: <https://shop.harjuelekter.fi/Latausasema-3-6kW-Type2-pistok/ekauppa/p8MMO3105L/>
- [47] Onninen verkkokauppa, Latausasema XCHARGEIN S-Sarja (MID) 1/3v 7,3/22kW, tuote esittely viitattu 23.20.2021, saatavilla: <https://www.onninen.fi/eaton-latausasema-xchargein-s-sarja-mid-1-3v-7-4-22kw/p/CGI687>
- [48] Oppcharge, Oppcharge, viitattu 23.20.2021, saatavilla: <https://www.oppcharge.org/>
- [49] Wu, Anguan, and Baoshan Ni. *Line Loss Analysis and Calculation of Electric Power Systems*, John Wiley & Sons, Incorporated, 2016. *ProQuest Ebook Central*, viitattu 3.11.2021, saatavissa: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/tampere/detail.action?docID=4548203>

- [50] Traficom, Ajoneuvokannan tilastot, viitattu 8.10.2021, saatavilla: <https://www.traficom.fi/fi/tilastot/ajoneuvokannan-tilastot?toggle=Ajoneuvojen%20tietoja%20haltijan%20koti-kunnan%20mukaan>
- [51] Canbing Li, et al, Influences of Electric Vehicles on Power System and Key Technologies of Vehicle-to-Grid, Science Press Beijing, Viitattu 24.11.2021, saatavilla: <https://link-springer-com.libproxy.tuni.fi/book/10.1007%2F978-3-662-49364-9>
- [52] Yü Energy Nottingham, smart vs amr meters, what is the difference?, viitattu 8.11.2021, saatavissa: <https://www.yuenergy.co.uk/news/smart-vs-amr-meters-what-is-the-difference/>
- [53] T. Simolin, et al, Assessment of prediction uncertainties in EV charging management, Tampereen yliopisto, viitattu 8.11.2021, saatavissa: https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/10024/130659/assessment_of_prediction_uncertainties.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [54] Miao Wang, et al, Mobile Electric vehicles, University of Waterloo, viitattu 8.11.2021, saatavilla: <https://link-springer-com.libproxy.tuni.fi/content/pdf/10.1007%2F978-3-319-25130-1.pdf>
- [55] Kari Suni, Olkiluoto 3 -ydinvoimalan polttoainelataus valmiina, Satakunnankansa, viitattu 13.10.2021, saatavilla: <https://www.satakunnankansa.fi/satakunta/art-2000007924489.html>
- [56] Fingrid, Suomen sähköjärjestelmä, viitattu 13.10.2021, saatavilla: <https://www.fingrid.fi/kantaverkko/sahkonsiirto/suomen-sahkojarjestelma/>
- [57] Traficom, Autotiheys vaihtelee Suomessa - vaihtoehtoisten käyttövoimien nousu näkyy uudella maalla, viitattu 6.10.2021, saatavilla: <https://www.traficom.fi/fi/ajankohtaista/autotiheys-vaihtelee-suomessa-vaihtoehtoisten-kayttovoimien-nousu-nakyy-uudellamaalla> 6.10
- [58] Kotkan kaupungin kotisivut, viitattu 6.10.2021, saatavilla: <https://www.kotka.fi/kotkan-kaupunki/tietoa-kotkasta/>
- [59] Kymenlaakson sähkö, Sähköautoilu: latauskapasiteettikartta, viitattu 6.10.2021, saatavilla: <https://www.ksoy.fi/sahkoverkko/sahkoliittymat/sahkoautoilu-latauskapasiteettikartta>
- [60] Juhani Bastman, kurssin sähköverkkotekniikan luennon 2 luentodiat, Tampereen yliopisto, viitattu 8.10.2021, saatavilla: <https://moodle.tuni.fi> > EE.EES.200 sähköverkkotekniikka 2021 > Luentokalvot > Luento 2
- [61] O.G.Losev, et al, Charging Station for Electric Transport Based on Renewable Power Sources, National Research Institute "Kurchatov Institute" Moscow, viitattu 12.10.2021, saatavilla: <https://link-springer-com.libproxy.tuni.fi/content/pdf/10.1134/S1023193520020093.pdf>
- [62] Maksym Olinyk, et al, Impact of electric vehicles and demand management systems on electrical distribution networks, International doi foundation, viitattu 12.10.2021, saatavilla: <https://link-springer-com.libproxy.tuni.fi/content/pdf/10.1007/s00202-021-01327-0.pdf>
- [63] Sähköinen liikenne ry, Sähköisen liikenteen tilannekatsaus Q3/2021, tilasto, viitattu 20.11.2021, saatavilla: <https://emobility.teknologiateollisuus.fi/sites/emobility/files/inline-files/2021%20Q3%20Sa%CC%88hko%CC%88inen%20liikenne%20tilannekatsaus%202021%2010%2026%20jaettava.pdf>
- [64] Mercedes-bez, eActross esittelysivusto, viitattu 1.10.2021, saatavilla: <https://www.mercedes-benz.com/en/vehicles/trucks/mercedes-benz-eactros-sustainable-fully-electric-and-quiet>
- [65] Man, MAN eTGM esittelysivusto, viitattu 1.10.2021, saatavilla: <https://www.man.eu/fi/fi/kuorma-autot/mallit/man-etgm/etgm.html>

- [66] Volvo, Volvo FL electric esittelysivusto, viitattu 1.10.2021, saatavilla: <https://www.volvotrucks.fi/fi-fi/trucks/trucks/volvo-fl/volvo-fl-electric.html>
- [67] <https://www.renault-trucks.com/en/newsroom/press-releases/renault-trucks-unveils-its-second-generation-electric-trucks-complete-ze>
- [68] Volvo, Volvo FH electric esittelysivusto, viitattu 1.10.2021, saatavilla: <https://www.volvotrucks.com/en-en/trucks/trucks/volvo-fh/volvo-fh-electric.html>
- [69] P. Papadopoulos, L. M. Cipcigan, N. Jenkins and I. Grau, "Distribution networks with Electric Vehicles," 2009 44th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), 2009, pp. 1-5., viitattu 24.11.2021, saatavilla: <https://ieeexplore-ieee-org.libproxy.tuni.fi/document/5429477>
- [70] Alexander Lucas, et al, harmonic impact of multiple electric vehicle fast charging, lainattu 21.11.2021, saatavilla: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378779615001534>
- [71] Lucas, A., Trentadue, G., Scholz, H. & Otura, M. 2018, "Power Quality Performance of Fast-Charging under Extreme Temperature Conditions", *Energies*, vol. 11, no. 10., viitattu 21.11.2021, saatavilla: <https://www.proquest.com/docview/2316225172?accountid=14242&pq-origsite=primo>
- [72] Liikenne fakta, Linja-autojen määrä, viitattu 22.11.2021, saatavilla: <https://liikenne-fakta.fi/fi/ymparisto/linja-autot/linja-autojen-maara>
- [73] Christophe Guille, George Gross, A conceptual framework for the vehicle-t-grid (V2G) implementation, viitattu 23.11.2021, saatavilla: <https://www-sciencedirect-com.lib-proxy.tuni.fi/science/article/pii/S0301421509003978?via%3Dihub>
- [74] Jonne Jäppinen, Tulevaisuuden energiajärjestelmä – sen haasteet ja mahdollisuudet, Fingrid oy, viitattu 9.12.2021