



RASKAAN LIIKENTEEN SÄHKÖISTÄMISPOTENTIALI SUOMEN PÄÄTEILLÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Sähkötekniikan koulutusohjelma, Kandidaatintyö

2024

Tekijät: Juho Kaitero

Joonas Rönkä

Tarkastajat: Tutkijaopettaja Tuomo Lindh

Nuorempi tutkija Altti Meriläinen

Tiivistelmä

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUT School of Energy Systems

Sähkötekniikan koulutusohjelma

Juho Kaitero

Joonas Rönkä

Raskaan liikenteen sähköistämispotentiaali Suomen päätteillä

Kandidaatintyö

2024

46 sivua, 23 kuvaa ja 6 taulukkoa

Tarkastajat: Tutkijaopettaja Tuomo Lindh ja Nuorempi tutkija Altti Meriläinen

Avainsanat: Raskas sähköinen tieliikenne, Suurteholatausteknologia, Akunvaihtoteknologia

Tämän kandidaatintyön tavoitteena on selvittää akunvaihto- ja suurteholatausteknologian nykytilanne sekä raskaan liikenteen määrä valituilla Suomen valtateilla. Tämän pohjalta kandidaatintyössä selvitetään tarvittava latauskapasiteetti sähköistymisasteittain 10 %, 50 % ja 100 %, sen alueellinen jakauma sekä miten latausasemia tulisi sijoittaa maantieteellisesti. Tutkimus on rajattu vain yli 35 000 kg kokonaispainoltaan oleviin kuorma-autoihin.

Kandidaatintyössä analysoidaan Fintrafficin ja Traficomin dataa raskaan liikenteen määristä valtatiekohtaisesti sekä kuorma-autojen kokonaismäärästä Suomessa viime vuosilta. Raskaan liikenteen kokonaismäärästä data on kerätty Autoalan tiedotuskeskukselta ja tämän pohjalta on arvioitu raskaan liikenteen sähköistämistä asteittain 10 %, 50 % ja 100 % sähköistämisasteilla.

Kandidaatintyössä päädyttiin tulokseen, missä suurteholataus- ja akunvaihtoteknologian hyödyntäminen täydentävät toisiaan ja kumpaakin ratkaisua voitaisiin käyttää samanaikaisesti yhtenä ratkaisuna ja mahdollisena vaihtoehtona. Olisi siis mahdollista ladata sekä vaihtaa ajoneuvon ajoakku. Raskaan liikenteen sähköistämiseksi Suomessa vaaditaan lisää ja maantieteellisesti paremmin sijoiteltua latausinfrastruktuuria ja / tai akunvaihtoasemia. Lataus- ja / tai akunvaihtoasemia tulisi sijoittaa 60 kilometrin säteellä toisistaan ja tasaisesti ympäri Suomea Euroopan Unionin esityksen mukaisesti.

Abstract

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

LUT School of Energy Systems

Degree Programme in Electrical Engineering

Juho Kaitero

Joonas Rönkä

Electrification Potential of Heavy-Duty Road Transport on Main Roads in Finland

Bachelor's thesis

2024

46 pages, 23 figures and 6 tables

Examiners: Associate Professor Tuomo Lindh and Junior Researcher Altti Meriläinen

Keywords: Electric Heavy-Duty Road Transport, High Power Charging, Battery-Swapping

The aim of this thesis is to investigate the current state of battery-swapping technology and high-power charging technology and the amount of heavy-duty road transport on selected Finnish highways. On this basis, the bachelor's thesis will determine the required charging capacity by electrification levels 10 %, 50 % and 100 %, its regional distribution and how the charging stations should be geographically located. This thesis is limited to trucks with a gross vehicle weight of over 35 000 kg.

The thesis analysed data from Fintraffic and Traficom on heavy-duty road transport volumes by motorway and on the total number of trucks in Finland in recent years. Data on the total number of heavy-duty road transport was collected from the Finnish Centre for Automotive Information and used as a basis for estimating the progressive electrification of heavy-duty road transport in 10 %, 50 % and 100 % electrification rate.

The thesis came to a conclusion where the use of high-power charging and battery-swapping technologies complement each other and both could be used simultaneously as a solution and a possible alternative. It would therefore be possible to charge and replace the vehicle's battery. More and better geographically located charging infrastructure and / or battery swapping stations are needed to electrify heavy goods vehicles in Finland. Charging and / or battery-changing stations should be located within a radius of 60 km of each other and evenly distributed throughout Finland, as proposed by the European Union.

KÄYTETYT MERKIT JA LYHENTEET

Lyhenteet

BEV	Battery Electric Vehicle, Akkusähköajoneuvo
Bio-CNG	Bio-Compressed Natural Gas, Biokompressoitu maakaasu
e-Diesel	Sähkö-diesel
EU	Euroopan Unioni
FCV	Fuel Cell Vehicle, Polttokennoajoneuvo
H2-ICE-DF	Hydrogen-Diesel Dual-Fuel Engine, Vety-diesel kaksoispolttoainemoottori
H2-ICE-SI	Pure Hydrogen Spark-Ignition Engine, Vety-kipinäsytytysmoottori
HCT	High-Capacity Truck, Korkean kapasiteetin kuorma-auto
HVO	Hydrotreated Vegetable Oil, Vesikäsitelty kasvisöljy
LAM	Liikenteen Automaattinen Mittaus
TCO	Total Cost of Ownership, Omistuksen kokonaiskustannukset
VT	Valtatie

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

KÄYTETYT MERKIT JA LYHENTEET

Sisällysluettelo	5
1 Johdanto	6
1.1 Tutkimuksen tavoitteet, rajaukset ja rakenne	7
2 Nykytilanne	10
2.1 Akunvaihtoteknologia	10
2.2 Suurteholatausteknologia	17
3 Raskaan liikenteen määrä pääteillä	22
3.1 Raskaan liikenteen määrä vuosien varrella	23
3.2 Kuorma-autojen määrä Suomessa	24
3.3 Raskaan sähköisen liikenteen vähäisyys Suomessa ja siihen vaikuttavat tekijät	26
4 Raskaan liikenteen sähköistäminen asteittain	28
5 Liikenteen määrä ja tarvittava latauskapasiteetti	31
6 Johtopäätökset	41
Lähdeluettelo	44

1 Johdanto

Nopeasti sähköistyvässä liikenteessä on paljon potentiaalia, kun sähköajoneuvojen määrä kasvaa jatkuvasti ja Euroopan komission asettamat ilmastotavoitteet vaativat uusia ratkaisuja raskaan tieliikenteen hiilidioksidipäästöjen vähentämiseksi (EC, 2023). Euroopan komissio on esittänyt, että vuoteen 2040 mennessä raskaan tieliikenteen hiilidioksidipäästöt tulee vähentyä 90 %:lla vuoden 2019 päästöihin verrattuna. Sähköajoneuvojen korkea ostohinta, toimintasäde ja ajoakkujen hinta on ollut aikaisemmin monelle kuljetusyhtiölle kynnyskysymys, kun pohditaan oman logistiikan sähköistämistä. Raskas liikenne on sähköistymässä kovaa vauhtia akkuteknologian ja erilaisten latausmallien myötä. Korkea ostohinta kompensoituu ajoneuvon elinkaaren aikana, sillä sähkö on tyypillisesti edullisempaa verrattuna bensiiniin tai dieseliin ja sähköajoneuvojen huoltokustannukset ovat matalammat. Nämä tekijät ovat kasvattaneet sähköisen raskaan liikenneteen suosiota. (ICCT, 2023)

Sähköajoneuvojen voimalinjan rakenne on huomattavasti yksinkertaisempi verrattuna ajoneuvoon, joka hyödyntää polttomoottoria voimalinjana. Syynä tähän on sähkömoottorin yksinkertainen rakenne verrattuna polttomoottoriin, jossa on suuri määrä liikkuvia osia. Vaikka nykyisin raskaat ajoneuvot pärjäävätkin kohtalaisen hyvin pelkällä sähköisellä voimansiirrolla, vaatii aihe vielä lisää tutkimusta. Vaihtelevan pituiset matkat ja suuret kuormat sekä vaihtelevat sääolosuhteet voivat aiheuttaa ongelmia sähköisille kuorma-autoille, mutta Suomessa ja Ruotsissa kokonaispainoltaan yli 64 000 kg olevia kuljetuksia on alettu siirtää jo täyssähköisille kuorma-autoille. (Pulse.fi, 2023) Raskaat ajoneuvot vaativat myös enemmän tehoa kuin kevyet henkilöautot ja tämä lisää tarvittavaa akkukapasiteettia, joka puolestaan kasvattaa ajoakkujen painoa sekä ajoneuvon kustannuksia.

Sähköinen liikenne vaatii infrastruktuuria ympärilleen, jotta ajoneuvoja saadaan ladattua. Tällä hetkellä kaksi potentiaalisinta vaihtoehtoa on latausmalli ja akunvaihtomalli. Latausmallin laajamittaista käyttöönottoa hidastavat useat haasteet, kuten pitkä latausaika, ajoneuvojen vaatima odotustila latauksen ajaksi, korkeat hankintakustannukset, rajoitettu liikkuvuusalue ja sähköverkon latauskuorman hallinnan vaikeus. (T.-y. Zhang et al., 2023)

Euroopan komission tavoite on vähentää raskaan tieliikenteen hiilidioksidipäästöjä 90 % vuoteen 2040 mennessä. (EC, 2023) Raskas tieliikenne tuotti vuonna 2020 yli 3,335 miljoonaa tonnia hiilidioksidipäästöjä, mikä oli noin 29,8 % liikenteen tuottamista kokonaispäästöistä Suomessa (Autoalan tiedotuskeskus, 2023). Vaikka maanteiden tavarankuljetusajoneuvojen osuus maailmanlaajuisesta ajoneuvokannasta on vain 9 % ja ajomatkojen kokonaismäärästä 17 %, niihin liittyvät maailmanlaajuiset elinkaaren aikaiset kasvihuonekaasupäästöt olivat 39 % maantieliikennesektorin kasvihuonekaasupäästöistä vuonna 2015 (Jahangir Samet et al., 2021). Sähköistyvä liikenne vähentäisi myös öljyriippuvuutta.

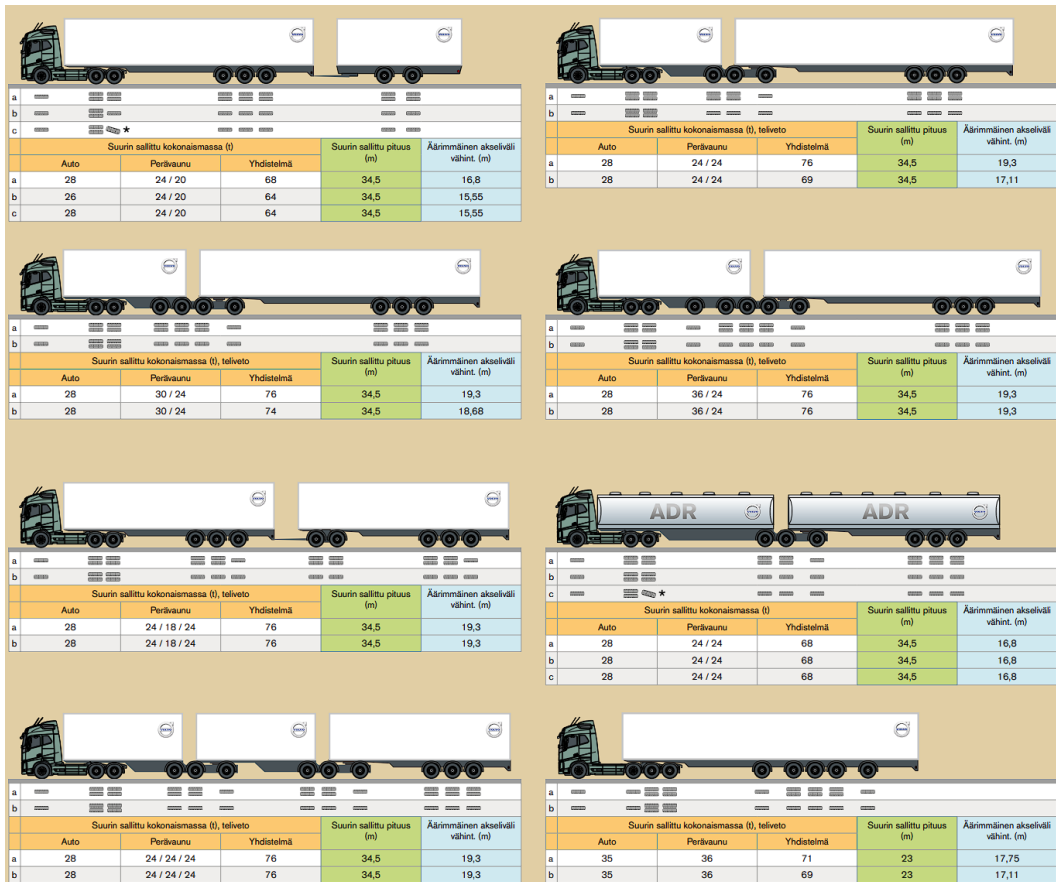
1.1 Tutkimuksen tavoitteet, rajaukset ja rakenne

Tämän tutkimuksen tavoitteena on selvittää raskaan liikenteen määrä päteillä Suomessa perustuen julkisiin tilastoihin sekä raskaan liikenteen lataukseen vaadittava latauskapasiteetin alueellinen jakauma. Työtä pohjustetaan kirjallisuuskatsauksella, jossa selvitetään raskaiden ajoneuvojen suurteholatauksen ja akuvaihtoteknologian nykytilanne ja kustannukset. Tutkimus antaa pohjan latausverkoston suunnittelulle eri skenaarioissa, jos suomen raskaasta liikenteestä korvataan sähköisillä kuorma-autoilla 10 %, 50 % ja 100 %.

Raskas liikenne eritellään tässä tutkimuksessa yli 35 000 kg kokonaispainoltaan oleviin ajoneuvoihin, jotta tutkimukseen saadaan enemmän dataa ja, jotta latauskapasiteetin alueellisen jakauman arvioinnista tulisi realistisempaa. Suomessa tähän yli 35 000 kg:n pääsääntöisesti kuuluvat yhdistelmäajoneuvot eli jotkin kuorma-autot, puoliperävaunut sekä täysperävauhalliset kuorma-autot. Raskaimman liikenteen sähköistäminen on haastavinta ja kun siinä onnistutaan, niin kevyemmän raskaan liikenteen sähköistämisen ei pitäisi tuottaa ongelmia. Tutkimuksessa perehdytään vain Suomen valtateillä liikkuvaan raskaaseen liikenteeseen, eli raskaat työkoneet ja linja-autot rajataan tutkimuksesta pois. Tutkittaviksi valtateiksi valitaan valtatie 1–6, jotka kulkevat etelä–pohjoinen suunnassa sekä valtatie 7, 9, 12, 23 sekä 26, jotka kulkevat itä–länsisuunnassa. Näin saadaan jokainen maakunta Manner-Suomen alueelta huomioon tutkimuksessa.



Kuva 1: Kuorma-autojen jaottelu perustuen Volvon mallistoon. (Volvo, 2019)



Kuva 2: Kuorma-autojen jaottelu perustuen Volvon mallistoon. (Volvo, 2019)

Kuvissa 1 ja 2 on esitetty Volvon malliston mukaiset raskaiden ajoneuvojen ja yhdistelmien pituudet ja massat. Tutkimuksessa hyödynnetään Volvon malleja ajoneuvojen ja ajoneuvo-yhdistelmien mittojen ja kokonaispainojen osalta. Tutkimuksessa ei ole väliä onko kyseessä ajoneuvoyhdistelmä vai ajoneuvo, kunhan kokonaispaino on yli 35 000 kilogrammaa. Fint-traffic:n sivuilta saadaan ladattua julkista dataa liikennemääristä valtateillää csv-muodossa ajoneuvoluokittain, jota hyödynnetään tutkimuksessa.

Tutkimuksen rakenne koostuu kuudesta luvusta. Luvussa 2 pohditaan akunvaihtoteknologian ja suurteholatauksen nykytilannetta ja niiden positiivisia ja negatiivisia ominaisuuksia. Luvussa 3 esitetään raskaan liikenteen määrän kehitys viime vuosina sekä sen kokonaismäärä Suomessa. Sen ohella pohditaan myös raskaan liikenteen vähäistä määrää ja siihen vaikuttavia tekijöitä. Luvussa 4 selvitetään raskaan liikenteen sähköistämistä asteittain ja siihen liittyen luvussa 5 pohditaan tarvittavan latauskapasiteetin määrää. Johtopäätökset esitetään luvussa 6.

2 Nykytilanne

Tässä luvussa perehdytään akunvaihto- ja suurteholatausteknologiaan ja miten se näkyy raskaan liikenteen sähköistymisessä tällä hetkellä ja mahdollisesti tulevaisuudessa. Raskaan liikenteen määrä valituilla valtateilla käsitellään luvussa 3, mutta sitä ennen on hyvä käsitellä sähköisen raskaan liikenteen kaksi tällä hetkellä potentiaalisinta latausvaihtoehtoa. Ensimmäiseksi käsitellään akunvaihtoteknologian nykytilanne ja lopuksi suurteholatausteknologian nykytilanne.

2.1 Akunvaihtoteknologia

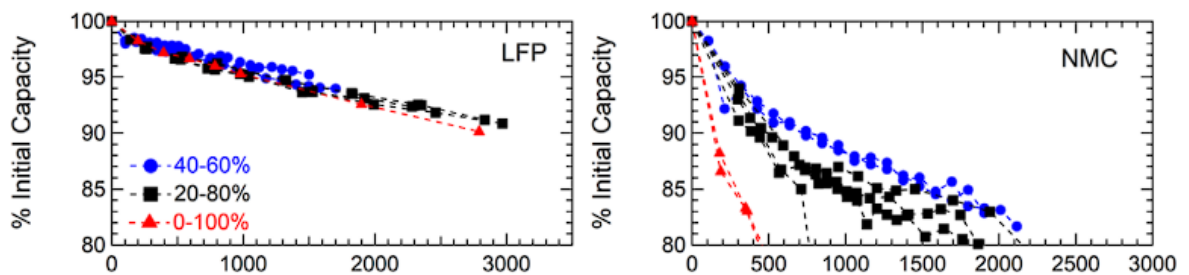
Akunvaihtoteknologian keskeisin idea on, että tyhjentyneet ajoakku siirretään lataukseen ja vaihdetaan uuteen täynnä olevaan ajoakkuun. Akun vaihtamisen käsite ilmestyi ensimmäistä kertaa vuonna 1990, ja New Yorkin Electric Light Companyn Hartford-niminen mies sovelsi akunvaihtoasemateknologiaa sähkötaksien alalla. (Ding et al., 2022) Ajoakun vaihto tapahtui 3–4 minuutissa hydraulikan avulla. Sähköajoneuvot menettivät kuitenkin vähitellen markkina-arvonsa polttomoottori-ajoneuvojen paremmuuden vuoksi. Muutaman viime vuosikymmenen aikana polttomoottoriajoneuvojen haitalliset ympäristövaikutukset ovat herättäneet uudelleen kiinnostuksen sähköajoneuvoja kohtaan. (Revankar & Kalkhambkar, 2021)

Maailmanlaajuisten raporttien mukaan polttomoottoriajoneuvojen käyttö aiheuttaa suuren määrän ilmansaasteita. Tällä hetkellä sopivin ratkaisu liikenteen hiilineutraaliksi saamiseen ovat sähköajoneuvot. Sähköajoneuvot ovat energiatehokkaampia kuin polttomoottorit, ja regeneratiivinen jarrutus parantaa ajoneuvojen tehokkuutta ja hyötysuhdetta entisestään. Yksi syy, joka haittaa useiden sähköajoneuvojen käyttöönottoa on akkujen pitkä latausaika. Toisaalta akkumateriaalien louhimiseen liittyy vakavia ympäristö-ongelmia, jotka puolestaan täytyy huomioida, kun puhutaan sähköisen liikenteen ekologisuudesta ja hiilineutraalisuudesta.

Litium-akut ovat vielä nykyisellään ylivoimaisin ratkaisu, sillä ne voidaan ladata paljon useammin kuin muut akut ja ne ovat edullisia. Litiumakku voidaan ladata jopa 14 000 kertaa. Yksi ratkaisu ajoakkujen ympäristö-ongelmiin voisi olla Suomalaisen yhtiön Broadbit Batteries:n keksintö, natrium-akku, joka hyödyntää natriumin lisäksi hiiltä, rikkiä ja hiekasta saatavaa piitä. Natriumakkuun voidaan varastoida jopa 30 % enemmän sähköä kilogrammaa kohti kuin litiumakkuun, mutta toistaiseksi se voidaan ladata teoriassa vain 800 kertaa eli se on 17,5 kertaa heikompi kuin kilpailukykyinen litiumakku. (Isomäki, 2021) Raskaan liikenteen käytössä akun yksi tärkeimmistä ominaisuuksista on kuitenkin nimenomaan akun pitkäkestoisuus. Litium-rautafosfaattiakku ($LiFePo_4$) eli lyhyemmin LFP-akku on tähän ratkaisu, sillä LFP-akulla on kemiallisten ominaisuuksien takia pidempi elinkaari ja suurempi

energiatiheys verrattuna muihin tällä hetkellä käytössä oleviin metallioksidiyhdisteistä koostuviin litiumakkuihin. Tämä mahdollistaa ajoneuvolle pidemmän toimintasäteen. Haittapuolia on esimerkiksi suuri paino verrattuna muihin litium-akkuihin, mutta se on kevyempi kuin perinteiset lyijyakut. (Y. Zhang et al., 2012)

NMC-akku eli Litium-Nikkeli-Mangaani-Kobolttioksidi-akku on yksi menestyneimmistä akkutyypeistä sähköajoneuvojen markkinoilla. Energiatiheydeltään NMC-akut ovat huomattavasti parempia (noin 250 Wh/kg) verrattuna LFP-akkuihin (noin 210 Wh/kg). (ICCT, 2021)



Kuva 3: LFP- ja NMC-akkujen vertailu, kun akku puretaan 40–60 %, 20–80 % ja 0–100 %. Y-akselilla on esitetty ajoakun maksimikapasiteetti (initial capacity) prosentteina ja x-akselilla purkautumissyvyys. (Preger et al., 2020) Purkautumissyvyydellä tarkoitetaan, kuinka paljon energiaa akkuun syötetään ja sieltä purkautuu tietyn syklin aikana.

Kuvasta 3 nähdään, kuinka eri purkautumissyvyydet eivät vaikuta LFP-akun maksimikapasiteettiin eikä elinkaareen eli syklimääriin yhtä paljon kuin NMC-akulla. Jos NMC-akku puretaan tyhjäksi, saadaan sillä vain 500 sykliä. Jos LFP-akku puretaan tyhjäksi niin saadaan silti lähes 2900 sykliä. NMC-akulla päästään lähes 2000 sykliin, jos akku puretaan 20–80 %. Samalla purkautumissyvyydellä päästään LFP-akulla noin 3000 sykliä. Lyhyemmästä elinkaaresta huolimatta NMC-akkuja hyödynnetään kuorma-autoissakin, esimerkiksi Volvo Trucks, Renault, MAN ja Daimler hyödyntävät NMC-akkukemiaa joissakin malleissaan. (ICCT, 2021)

Ylen artikkelin (Lähdetluoma, 2022) mukaan kuorma-autolla saatetaan ajaa jopa 20 tuntia vuorokaudessa ja se tekee noin 300 000 kilometriä vuodessa. Jos oletetaan, että keskimäärin kuorma-auton toimintasäde on 300 km, niin pelkästään yhdessä vuodessa latauskertoja tulee noin 1000, joka on 200 kertaa enemmän kuin mitä Broadpit Batteries:n ympäristöystävällisemmän ajoakun voi toistaiseksi ladata. Samalla litiumakulla voidaan periaatteessa ajaa jopa 14 vuotta. Broadpit Batteries:n akun kapasiteetti on 30 % suurempi kuin litiumakulla, joten vertailu ei ole täysin reilu.

Akunvaihtoteknologian vaatimat akkujenvaihtoasemat varastoivat ja lataavat suuren määrän akkuja, joka on suuri paloriski. Akkupalon voi aiheuttaa ylilataaminen, korkea lämpötila tai kolhu, ja syttymisen jälkeen se on erittäin riskialtis ja vaikea sammuttaa. Vielä nykyisin säh-

köajoneuvojen akuissa oleva litium (Li) vapauttaa palaessaan myrkyllisiä kaasuja, voimakkaita tulisuihkuja tai purkauksia. Liekit, kipinät ja heitteet voivat sytyttää muita lähellä olevia materiaaleja. (SPEK, 2021) Edellä mainittu LFP-akku on myös paloturvallisempi, sillä litium-rautafosfaatti-yhdistelmällä on parempi lämpökemiallinen stabiilius verrattuna muihin litium-ioniakkuihin. Nykyiset polttonesteet, mitä esimerkiksi diesel-käyttöiset kuorma-autot käyttävät ovat silti paloherkempiä, kuin ajoakut, mutta akkupaloo on vaikeampi sammuttaa. Tämä voi koitua ongelmaksi, kun suuri määrä akkuja on varastoituna yhdessä paikassa. Tosin tähän paloriskiin voitaisiin mahdollisesti varautua akunvaihtoasemien hyvällä maantieteellisellä sijoittelulla.

Innovatiivinen tapa ladata sähköajoneuvo tapahtuu vaihtamalla mekaanisesti koko energialähde eli ajoakku. Henkilöajoneuvoissa tyhjäksi puretut akut vaihdetaan täysin ladattuihin akkuihin. Nämä tyhjentyneet akut ladataan latausstrategian mukaisesti ja asetetaan saataville vaihtoa varten. Akunvaihtotekniikka ja akunvaihtoasemat voisivat olla sopivin sähköinen korvaaja perinteisille polttoaineasemille, kun otetaan huomioon ihmisten nykyiset ajotottumukset. (Revankar & Kalkhambkar, 2021) Kokeilussa olevat vetyautot eivät vielä pärjää sähköllä toimiville ajoneuvoille huonon energiatehokkuutensa takia. Vetypolttoaineen käytössä on kuitenkin potentiaalia korvata sähkö energianlähteenä, sillä vety on maailmankaikkeuden yleisin alkuaine ja sitä on helppo tuottaa esimerkiksi vedestä elektrolyysillä. Vielä tois-taiseksi vetypolttoaineella toimivan ajoneuvon kehitys on hyvin kaukana akkukäyttöisestä ajoneuvosta, mutta tulevaisuudessa vetyauto voisi olla käytännöllisempi.

Akkujen vaihtaminen sähköajoneuvoon voisi olla tehokas tapa saavuttaa ajoneuvojen sähköistyminen, koska sen etuna on odotusaikojen ja hankintakustannusten vähentäminen sekä käyttäjien ajoneuvon toimintasäde-ahdistuksen lievittäminen. Ensinnäkin "latauksen" odotusaika voi lyhentyä huomattavasti, koska sähköauton akku saadaan vaihdettua 3–5 minuutissa. Toiseksi, lyhyt akunvaihto-aika voi osittain lievittää käyttäjien kantaman rajoittamisesta johtuvaa ahdistusta. Kolmanneksi, akunvaihtomalli voi pienentää alkuvaiheen hankintakustannuksia akkujen vuokrauspalvelujen avulla.

Ajoakkujen leasing- eli vuokrausmalli on liiketoimintamalli, jossa asiakkaat eivät osta akkuja suoraan, vaan voivat vuokrata ne tietyksi ajaksi ja maksaa ajoakusta käyttömaksun. Leasing-sopimukseen sisältyy yleensä määräyksiä akkujen kunnossapidosta ja akkujen vaihtamisesta, jos kapasiteetti laskee alle tietyn raja-arvon alittuessa sekä joskus jopa tiepalvelumaksu. (Gonzalez-Salazar, Kormazos & Jienwatcharamongkhon, 2023)

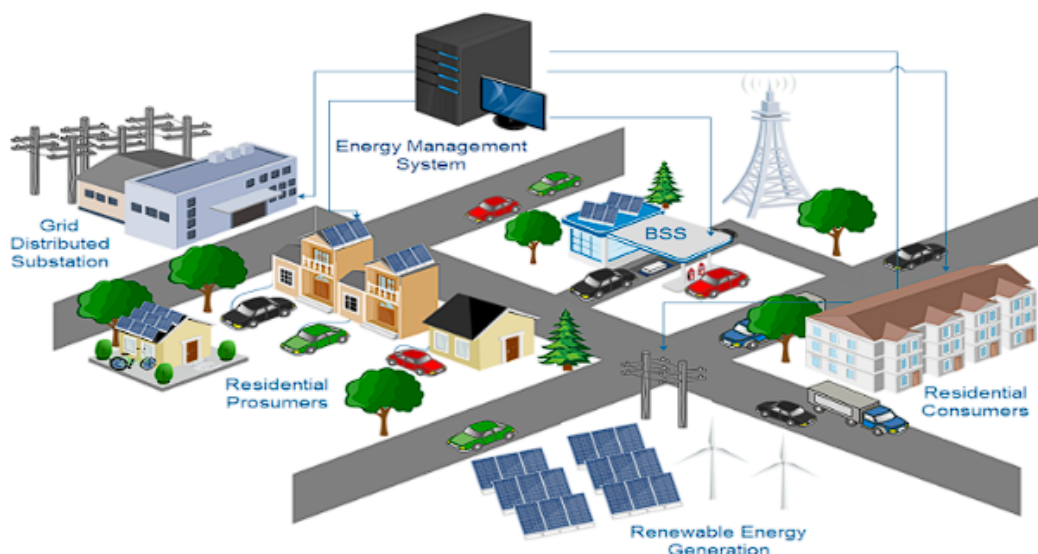
Sähköajoneuvon akku on iso osa koko ajoneuvon hinnasta. Jos akut tulisivat vuokrauspalvelun kautta ei autoa ostettaessa tarvitsisi maksaa koko akun hintaosaa ajoneuvon hinnasta. Tällöin ajoneuvojen osto hinnat alenisivat ja asiakas maksaa vain uudesta vuokra-akusta,

jonka asiakas käy vaihtamassa akunvaihtoasemalla. Akunvaihtoasemat voivat mahdollistaa uusiutuvien energialähteiden käytön ja vähentää edelleen kasvihuonekaasupäästöjä. (T.-y. Zhang et al., 2023)

Akunvaihto voisi tapahtua muutamallakin eri tavalla. Yksi mahdollinen malli on, että ajoneuvo ajetaan sisälle tilaan akunvaihtoasemalla, jossa automatisoitu järjestelmä vaihtaa tyhjän akun uuteen, jonka jälkeen ajoneuvo ajetaan pois. Toinen malli pohjautuu henkilön omaan toimintaan, jossa akut vaihdetaan itse. Tämä tosin ei toimi kuorma-autoilla, jonka ajoakku voi painaa useita tuhansia kiloja, mutta esimerkiksi trukin avustuksella tämä voisi toimia.

Kumpikin malli saattaisi vaatia ajoneuvojen valmistajilta yhteistyötä ja standardeja, jotta ajoakuille saadaan spesifit paikat eri ajoneuvojen valmistajien ajoneuvoissa. Raskailla ajoneuvoilla esimerkiksi kuvan 5 mukaisesti jossain ajoneuvon pohjassa tai kuorma-auton ohjaamon ja perävaunun välissä. Yksi ratkaisu tähän voisi olla ajoakkujen valmistamisen ulkoistaminen ajoneuvojenvalmistajilta, jolloin yksi tai muutama akunvalmistaja tuottaa kaikkiin sähköisiin kuorma-autoihin ajoakut. Tällä voitaisiin saada standardisoidut ajoakut ja akkujenvaihtoasemilla ei olisi huolta sopivan ajoakun löytymisestä.

Verrattuna suurteholatauspisteisiin akkujenvaihtoasemien etuihin kuuluu ajoneuvon lataaminen lyhyemmässä ajassa ja ajoakkujen lataaminen varastoon tai latauspisteillä alhaisen sähkön hinnan aikoina. Käyttämällä asianmukaisia optimointistrategioita akkujenvaihtoasemat voivat edelleen vähentää latauskustannuksia, tehohäviötä ja sähköverkon jännitepoikkeamaa. (Ding et al., 2022)



Kuva 4: Akunvaihtoaseman integrointi sähköverkkoon (lähteet: Revankar & Kalkhambkar, 2021)

Kuvassa 4 on esitetty, millä tavalla akunvaihtoaseman (BSS, Battery-Swapping Station) saadaan integroitua sähköverkkoon. Ideana on myös, että akunvaihtoasemia voidaan käyttää sähkövarastoina sähkökatkosten aikana. Akunvaihtoasema käyttää sähköjakelujärjestelmää ajoakkujen lataamiseen, mutta akunvaihtoasemalta voidaan syöttää energiaa myös takaisin sähköverkkoon. Tämä voisi tasapainottaa sähköjakeluverkon kuormaa. Akunvaihtoasemien on myös helppo hyödyntää uusiutuvaa energiaa, esimerkiksi aurinkopaneelien muodossa, jotta latausasemasta saadaan omavaraisempi. Toisaalta jos akunvaihtoasemaa käytetään sähkövarastona sähkökatkon aikana ja teho hyödynnetään sähköverkkoon, niin se on suoraan pois ajoakkujen latauskapasiteetistä. Logistiikka ja sen myötä raskas liikenne on suunniteltu kuljettamaan kuormaa vuorokauden ympäri, joten tämä akunvaihtoaseman tehon syöttäminen sähköverkkoon ei saa vaikuttaa suuresti vapaana olevien täyteen ladattujen ajoakkujen määrään.

Akunvaihtoasemien käyttöönottoa varten on esitetty erilaisia malleja, joista yksi on nimeltään optimaalista suunnittelua varten keskitetty latausmalli. Tässä mallissa akut ladataan keskuslatausasemalla. Sitten ne jaetaan akunvaihtoasemien kesken. Lisäksi akunvaihtoasemilla ei ole latauslaitteita, ja tyhjentyneet akut palautetaan keskuslatausasemalle ladattavaksi. (Shaker, Farzin & Mashhour, 2023) Tällöin vaadittaisiin logistiikkaa kuljettamaan ajoakkuja edes takaisin akunvaihtoasemien välillä.

Toinen malli kaupallistaisi kaikki akunvaihtoasemat, kuten nykyisetkin huoltoasemat ja pitäisi ajoakkujen latauslaitteet jokaisella asemalla. Tällöin tyhjentyneet akut pysyisivät samalla asemalla, kunnes ne on ladattu täyteen ja vaihdettu toiseen ajoneuvoon.

Kuvassa 5 on esitetty mahdollisia positioita, johon akku voitaisiin sijoittaa ja josta se olisi mahdollisimman helppo ja nopea vaihtaa. Raskaat ajoneuvot ovat kooltaan suuria, joka tarjoaa mahdollisuuden sijoittaa jopa monia vaihdettavia akkuja eri puolille ajoneuvoa ilman, että se vähentää hyötykuorman määrää. Sijoittamalla monta akkua eri puolille ajoneuvoa voidaan mahdollisesti pidentää ajoneuvon toimintasädettä. Toisaalta raskaat akut lisäävät ajoneuvon massaa ja tarvittavaa ajoneuvon tehon määrää.

Akunvaihtoteknologian täydelliseksi hyödyntämiseksi vaadittaisiin myös tiukat standardit ajoakuille, jotta mikä tahansa akku sopisi mille tahansa ajoneuvolle ajoneuvotyypit tietenkin huomioiden. Tässä suurimpina kysymyksinä tulee vastaan ajoakun muoto, massa ja mitat. Akunvaihtoaseman näkökulmasta jonkin muotoinen standardointi ajoakkujen sijoittelulle ajoneuvoon tulisi myös huomioida. Kuten kuvassa 5 on esitetty, on olemassa monta vaihtoehtoa, minne ajoakun voisi raskaassa ajoneuvossa sijoittaa. Näiden lisäksi myös ajoneuvojen valmistajien oma suhtautuminen akunvaihtoteknologiaan tulisi olla myönteistä, jotta akunvaihtoteknologian ottaminen käyttöön olisi yhteiskunnallisesti kannattavaa. Esimerk-



Kuva 5: Punaisella suorakulmiolla merkattu mahdolliset positiot akulle raskaassa ajoneuvossa, josta akku olisi helppo vaihtaa (pohjautuu: Kim, Song & Choi, 2015)

kinä Saksassa kokeiltu raskaan liikenteen sähköistämismalli, jossa moottoritien ylle rakennettiin ilmapirtajohdot kolmeen kohteeseen. Kuorma-autoliikenne hyödyntää ilmajohtoja junnaliikenteen tyyliisesti ja kulkee valtateillä vain yhtä kaistaa tulo- ja menosuuntaan. Tämä on kerännyt valtavan määrän kritiikkiä ja sähköajoneuvojen valmistajat, kuten Daimler ja DHL eivät ole suostuneet kehittämään ja jatkamaan kehitystyötä liittyen virtajohtotekniikkaan. (Kauppalehti, 2023) Tämä ajoneuvovalmistajien kriittinen suhtautuminen liikenteen sähköistämismenetelmiin voi koitua myös akunvaihto- ja suurteholatausteknologian kohtaloksi, jos uusia ja parempia innovaatioita tulee esille, esimerkiksi induktiokäämien käyttö asfaltin alla. Tosin induktiokäämien hyödyntäminen on oletettavasti todella kallis hanke, joten sekään tuskin tulee lähitulevaisuudessa suuressa mittakaavassa tapahtumaan.

Valmistaja	Ajoneuvon kokonaispaino	Akun kapasiteetti	Toimintasäde	Akun paino
BYD T9	36 t	350 kWh	200 km	2800 kg
Tesla-Semi	36 t	600 kWh	480 km	4800 kg
Daimler	40 t	550 kWh	400 km	4500 kg
Volvo FH	68 t	540 kWh	300 km	

Taulukko 1: Taulukossa on esitetty eri valmistajien ajoneuvon ja akun ominaisuuksia. (Al-Hanahi et al., 2021)

Taulukossa 1 on esitetty neljän eri sähkökuorma-auton valmistajan ajoneuvojen ja akun ominaisuuksia. Taulukosta nähdään hyvin ajoneuvon kokonaispainon, akun painon ja kapasiteetin suhde toimintasäteeseen. Akun mallia ei ole kerrottu. Jos verrataan BYD T9:ää ja

Tesla-Semi:ä toisiinsa, huomataan, että ajoneuvojen kokonaispaino on sama. Ainoat suuret erot ovat akkujen painoissa (Teslalla 2000 kg painavampi) ja akun kapasiteetissä (BYD T9:llä 250 kWh pienempi). BYD T9:n kapasiteetiltään 250 kWh pienempi akku huomataan ajoneuvon 280 km lyhyempänä toimintasäteenä vaikka Teslan akku painaa 2000 kiloa enemmän. Volvo FH Electric:in ajoakun painosta ei löydy tietoa. Volvon ja Daimlerin täyssähkökuorma-autoilla akkujen kapasiteetit ovat lähes yhtä suuret, mutta ajoneuvon kokonaispaino näkyy toimintasäteessä, joka on Volvolla noin 100 km lyhyempi. Tämä akkujen painon ja kapasiteetin vaihtelu ajoneuvovalmistajien kesken tulisi huomioida akunvaihtoasemien käyttöönoton yhteydessä, jotta ei tule vastaan tilannetta, jossa sopivaa ajoakkua ei löydy akunvaihtoasemalta.

Kiinassa akunvaihtoteknologian kehitys ja käyttöönotto kuorma-autoille on edennyt kovaa vauhtia. Vuonna 2022 kaikista Kiinan kuorma-autoista 49,5 % toimivat akunvaihtoteknologialla. Näitä kuorma-autoja käytetään lyhyillä, yhdensuuntaisilla matkoilla (alle 100 km) ja akut ovat tyypillisesti kapasiteetiltään 141 kWh tai 282 kWh. (Hongyang Cui & Niu, 2023)

2.2 Suurteholatausteknologia

Suurteholataus tarkoittaa lataustekniikkaa, jossa ajoneuvon akun lataamiseen käytetään suurta tehoa. Yleensä tämä teho on 150 kW–350 kW ja latausaika on noin 10–45 minuuttia ajoneuvon tyypistä ja lataustarpeesta riippuen. Mitä suurempi kapasiteetti akussa on, sitä enemmän aikaa kuluu sen lataukseen. Suurteholatausta ei tule terminä sekoittaa pikalatauksen kanssa. Pikalatauksessa teho on yleensä enintään 50 kW ja latausaika on useita tunteja ajoneuvon tyypistä ja lataustarpeesta riippuen. Näin ollen suurteholatauksella (350 kW) ajoneuvoa voidaan ladata nopeammin ja seitsemän kertaa suuremmalla teholla kuin pikalatauksella (50 kW). Silti esimerkiksi taulukon 1 mukaisen sähköisen kuorma-auton, jonka kokonaispaino on 40 000 kg ja akun kapasiteetti on 550 kWh, lataamiseen 350 kW:n suurteholatauksella 80 % lataustilaan kestää 78 minuuttia ja täyteen asti 102 minuuttia. 1 MW:n suurteholatauksella tämä lataus kestäisi 30 minuuttia 80 % lataustilaan ja 35 minuuttia täyteen asti. Mitä suurempi kokonaispaino raskaalla ajoneuvolla on, sitä suurempi akun kapasiteetinkin täytyy olla.



Kuva 6: Suomessa käytössä oleva Volvo FH Electric (Lähteet: Pulse.fi, 2023)

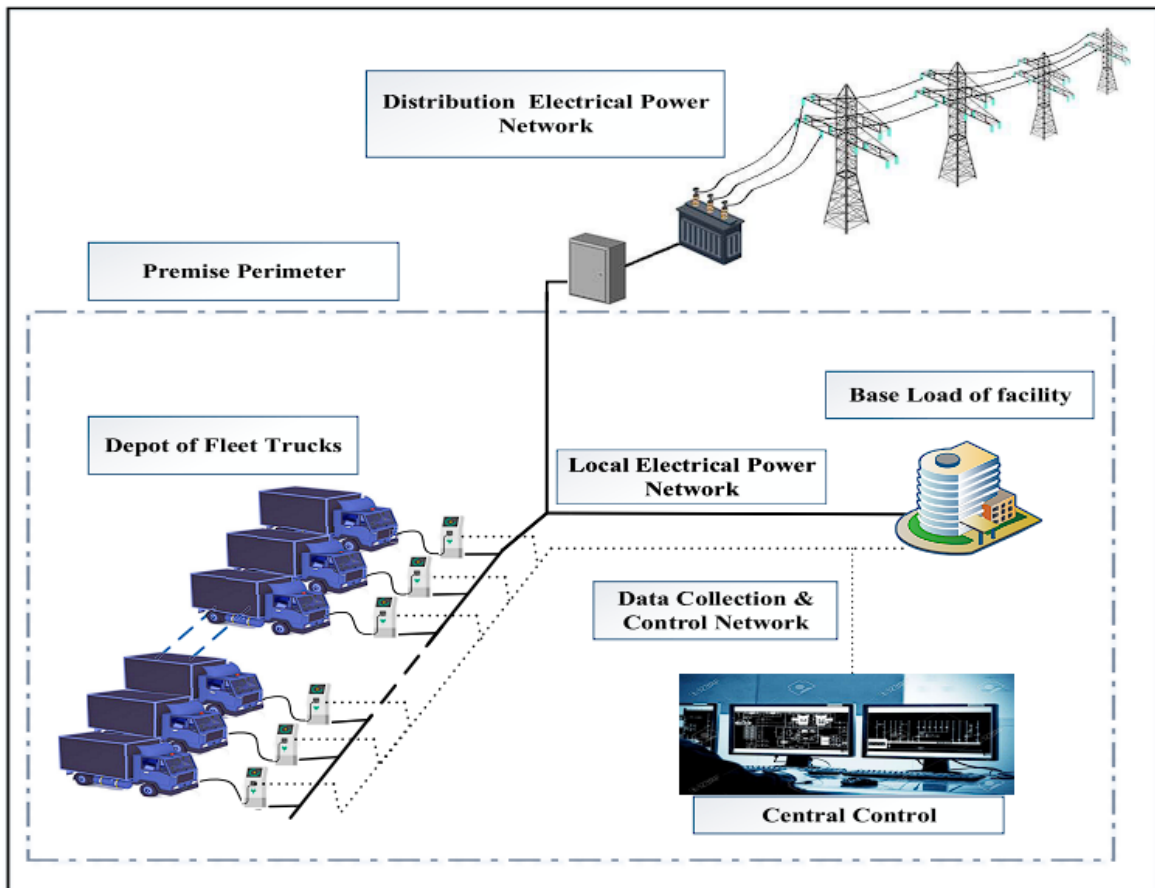
Tällaisia kokonaisteholtaan noin 1 MW:n latauslaitteistoja on jo esimerkiksi DB Schenkerin terminaalissa Viinikkalassa (Pulse.fi, 2023), jolla ladataan muun muassa kuvassa 6 näkyvää Volvo FH Electric HCT-kuorma-autoa. Tämän 68 000 kg kokonaispainoltaan olevan Volvo FH Electric:n akustoon kuuluu 6 ajoakkua, joiden yhteenlaskettu nimelliskapasiteetti on 540 kWh. 250 kW:n tasajännite-teholatauksella ajoakun täyteenlataamiseen menee noin kaksi

tuntia (Volvo, 2023a). Kyseisellä täyssähkökuorma-autolla ajetaan Lempäälän ja Vantaan välillä.

Suurteholatausteknologiasta saadaan suurin hyöty irti, jos sen vaatima latausinfrastruktuuri saadaan otettua käyttöön valtakunnallisesti kaikkien suurimpien teiden yhteyteen. Tämä vaatii itsessään jo suuria investointeja sähköverkkoihin sekä latausasemien rakentamiseksi. Tulevan latausinfrastruktuurin sijainnit tulisi ihanteellisesti valita niin, että se ei katkaise nykyistä toimintamallia, joten sen tulisi optimaalisesti sopia useiden ajoneuvojen nykyisiin pidempiin pysähdyksiin. (Sauter et al., 2021)

Tulevaisuudessa raskaiden ajoneuvojen latauslaitteet voivat olla jopa yli yhden megawatin. Raskaan liikenteen ajoneuvot ovat kalliita ja niiden käytön tulee olla jatkuvaa, jotta niistä saadaan mahdollisimman paljon hyötyä, joten latauksen tulee tapahtua taukojen aikana. Latausasemat tulee myös suunnitella sillä tavalla, että siellä voidaan ladata useampaa ajoneuvoa 1 MW:n teholla (Oikkonen, 2022). Ajoneuvojen latureiden määrän puute voi tulevaisuudessa olla pullonkaula sähköisen liikenteen sujuvuudessa (Ukkonen, 2022). Suomessakin on käytössä jo 1 MW:n latauslaitteistoja esimerkiksi Viinikkalassa.

Jatkossa olisikin tärkeää miettiä minne latausasemia ja -pisteitä sijoitetaan, esimerkiksi jos lataus suoritettaisiinkin suurella teollisuusalueella, jossa tehokuormat ovat jo valmiiksi suuria, eikä moottoriteiden varrella, jossa ei ole juuri mitään tehokuormaa mahdollisten latausasemien lisäksi (Halvorson, 2021). Teollisuusalueiden latauspisteiden hyödyt saataisiin valjastettua parhaaseen hyötykäyttöön, jos latausinfrastruktuuria saataisiin asennettua teollisuuden varastojen läheisyyteen. Näin sähkökäyttöiset kuorma-autot voidaan ladata vaikka kuormauksen yhteydessä.



Kuva 7: Paluu tukikohtaan -menetelmä (Lähteet: Al-Hanahi et al., 2021)

Kaupallisessa kuorma-autokaluston käytössä puhutaan yleensä paluu tukikohtaan -menetelmästä, jossa päivän jälkeen raskaat ajoneuvot ajetaan takaisin yhtiön omiin tiloihin, muun muassa varikolle tai varastoon. Näin ollen latausasemia voitaisiin asentaa yhtiön omiin tiloihin, jolloin sähköajoneuvoja voidaan ladata yön yli, eli suurteholatausta ei välttämättä tarvita. Kun suurteholatausta ei käytetä niin ajoakku pysyy toimintakykyisenä pidempään eli sen käyttöikä kasvaa (Oikkonen, 2022). Tämä käytäntö vaatisi raskaan liikenteen ajoneuvoilta erittäin suurikapasiteettiset akut, jotta ajotehtävät saadaan suoritettua ja ajoneuvo saadaan samalla latauksella myös takaisin latauspaikkaan. Paluu tukikohtaan -käytäntö voisikin sopia paremmin lyhyempiä matkoja ja pienempiä kuormia kuljettaville sähköisille kuorma-autoille.

Jotta latauslaitteiden tuottamaa tehoa voidaan hyödyntää, on sähköverkossa kuitenkin oltava riittävästi kapasiteettia haluttuna ajankohtana ja halutussa paikassa. Tällaista kapasiteettia ei välttämättä ole vielä saatavilla paikoissa, joissa latauslaitteita tarvitaan, kuten esimerkiksi huoltoasemilla, kuorma-autojen kuljettajille suunnatuilla yöpymispaikoilla ja valtateiden varsilla. Sähköverkon parantaminen latausinfrastruktuurin vaatimalle tasolle edellyttää merkittäviä investointeja. (Tol et al., 2022) Tämä infrastruktuurin kehittäminen vaaditulle tasolle pidentää aikajännitettä, jolla raskas liikenne saadaan sähköistettyä ja kaupalliseen käyttöön.

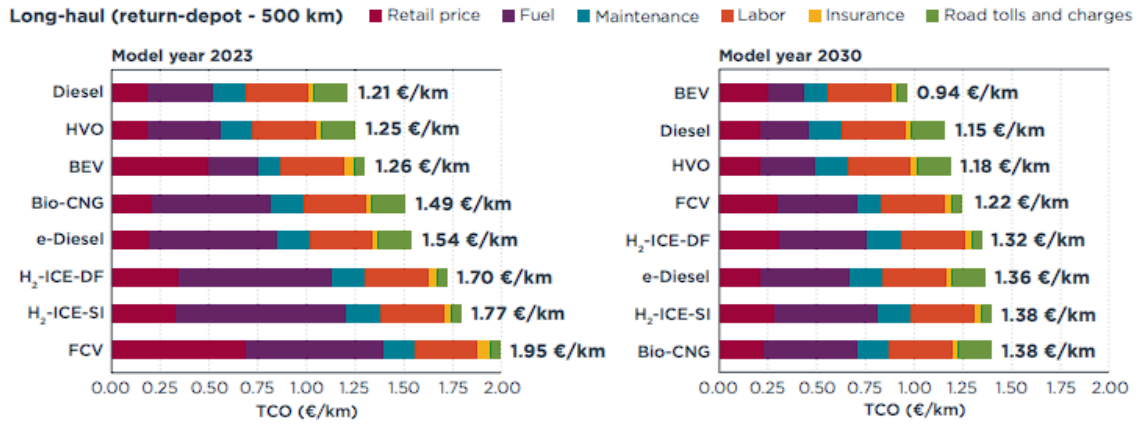
Julkiset latauspaikat tuottavat haasteita, jos latauspaikoilla on ruuhkaa. Tällöin jo edellä mainittu latausinfrastruktuurin puute aiheuttaisi pullonkaulailmiön ja haittaisi raskaan liikenteen logistisia toimintoja viivyttämällä aikatauluja. Toisaalta suuri määrä suurteholatauspisteitä kuormittaa paikallista sähköjakeluverkkoa huomattavasti. Esimerkiksi seitsemän 1 MW suurteholatauspisteen samanaikainen käyttö vastaa 7 MW tehonkulutusta. Tällä tehonkulutuksella saadaan ladattua vain seitsemän autoa. Tulevaisuudessa liikenteen vain sähköistyessä enemmän, tulee sähköverkon kuormituksen kanssa ongelmia, vaikkakin nykyiset latausasemat voivat sisältää paikallisakun, jonka tehtävänä on tasata suurimpia kysyntäpiikkejä sähköverkosta. Jos seitsemää ajoneuvoa ladataan nykyisen suurteholatauksen 350 kW:n maksimiteholla samaan aikaan, aiheuttaisi se 2.45 MW:n kuorman sähköjakelukapasiteettiin.

Suurteholatauksessa yksi tärkeistä kysymyksistä on sähkön hinta latauksen aikana. Esimerkiksi raskaan ajoneuvon lataaminen 35 minuutin ajan 1 MW teholla maksaisi vuoden 2023 pörssisähkön keskihinnalla 7 snt/kWh noin 40,83 euroa tai 350 kW:n teholla lataaminen 102 minuutin ajan maksaa 41,65 euroa. Tällä latauksella kuorma-autolla tulisi päästä tulevaisuudessa vähintään samoihin lukemiin toimitasäteessä kuin polttomoottoria voimanlähteenään käyttävällä kuorma-autolla säällä kuin säällä. Uusimmilla diesel- ja kaasukäyttöisillä kuorma-autoilla voidaan päästä yli 1000 km toimitasäteisiin (Volvo, 2024). Jos katsotaan taulukon 1 ajoneuvojen valmistajien ilmoittamia ajoneuvojen massojen ja akkujen kapasiteettien suhteita toimitasäteisiin, niin 300 km toimitasäteeseen päästään jo nykyisellä teknologialla. Pohjoismaiden lämpötilojen vaihtelu vaikuttaa toimitasäteeseen, mutta tätä käsitellään enemmän luvussa 3.

Paluu tukikohtaan -menetelmässä ajoneuvon lataaminen voitaisiin suorittaa öisin kello 23.00–07.00, jolloin pörssisähkön hinta on keskimäärin alhaisinta ja suurteholatausta ei tarvittaisi (NordPool, 2024). Kaikissa tapauksissa paluu tukikohtaan -menetelmää ei voida käyttää, kuten esimerkiksi pitkän matkan kuljetuksissa tai jakeluliikenteessä, joka on liikenteessä noin 20 tuntia päivässä, jolloin ajoneuvo on ladattava sähkön hinnasta ja sähköverkon kapasiteetistä huolimatta paikassa kuin paikassa. (Lähdetluoma, 2022)

Jos katsotaan esimerkiksi torstaita 4.1.2024, jolloin vuorokauden keskimääräinen pörssisähkön hinta oli 109,97 snt/kWh ja suoritetaan samanlainen 35 minuutin lataus 1 MW teholla, hinnaksi yhdelle lataukselle tulee noin 641,46 euroa ja 350 kW:n latausteholla 102 minuutin latausajalla hinta olisi hieman korkeampi, 654,32 euroa. Toisaalta sellaisina aikoina jolloin pörssisähkön hinta on negatiivinen maksetaan ajoneuvon lataamisesta asiakkaalle. Verrattuna bensiinin ja dieselin polttoaineen hintaan on tällainen suuri hinnan vaihtelu erittäin harvinaista. Sähköinen liikenne vaatii latauksen optimointia, jotta sähkön hinta ja sähköverkon kapasiteetti vastaa ladattavien ajoneuvojen määrää. Suuret kuljetusyhtiöt oletettavasti

suojaavat sähköhintansa pitkälle tulevaisuuteen, joten suuresta sähköhinnan vaihtelusta ei todennäköisesti koidu ongelmia.

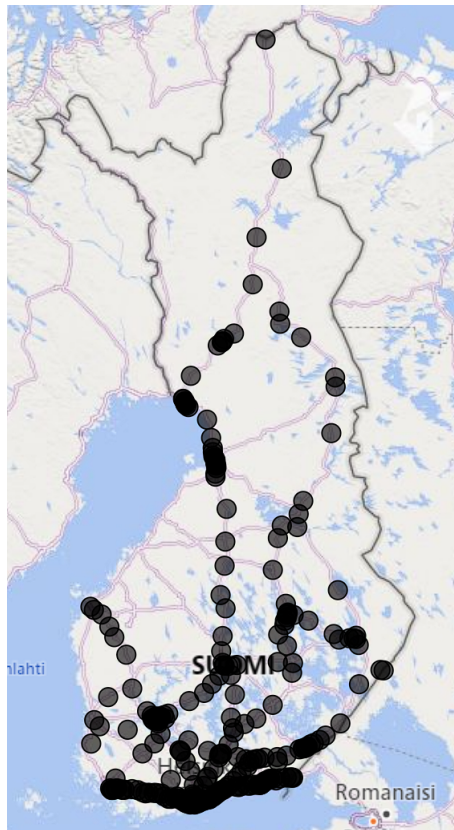


Kuva 8: Kuorma-autojen energianlähteiden hinnat per kilometri. (ICCT, 2023) Tässä kuvassa olennaisin lyhenne on BEV eli akkusähköajoneuvo ja sen kustannusten vertailu dieselkäyttöisen kuorma-auton käyttökustannusten kehittymiseen. Muut kuvan taulukon lyhenteet ovat avattu sivulla 4.

Kuvassa 8 on esitetty The International Council on Clean Transportation:in tutkimuksen tuloksia vuodelta 2023, jossa on esitetty eri energianlähteitä hyödyntävien pitkän matkan kuorma-autojen TCO (Total Costs of Ownership) eli suomeksi kuorma-auton omistamisen kokonaiskustannukset ja ennuste vuoden 2030 tilanteesta. Huomataan, että vielä vuonna 2023 diesel-käyttöinen kuorma-auto on ollut omistuskustannuksiltaan 3,97 %:a edullisempi vaihtoehto akkukäyttöiseen täyssähkökuorma-autoon (BEV) verrattuna. Vuonna 2030 tilanne on ennusteen mukaan toinen, jolloin täyssähköinen kuorma-auto on 18,3 %:a edullisempi verrattuna diesel käyttöiseen kuorma-autoon.

3 Raskaan liikenteen määrä pääteillä

Tässä luvussa käsitellään julkista dataa raskaan liikenteen määristä ja pyritään muodostamaan kokonaiskuva valittujen valtateiden 1–7, 9, 12, 23 ja 26 liikennemääristä. Tämän pohjalta arvioidaan tarvittava latauskapasiteetti, jos asteittain 10 %, 50 % tai 100 % kuorma-autoliikenteestä sähköistettäisiin. Liikennedatata on tutkimuksessa kerätty tilastokeskuksen ja Fintrafficin julkaisemista LAM-kartoista (Liikenteen Automaattinen Mittaus). Liikenteen Automaattinen Mittaus toimii tiehen asennetun silmukan sähkömagneettisella induktiolla, joka mittaa mm. ajoneuvon nopeuden, pituuden, ajoneuvoluokan sekä ohituksen kellonajan. (Fintraffic, 2023a)



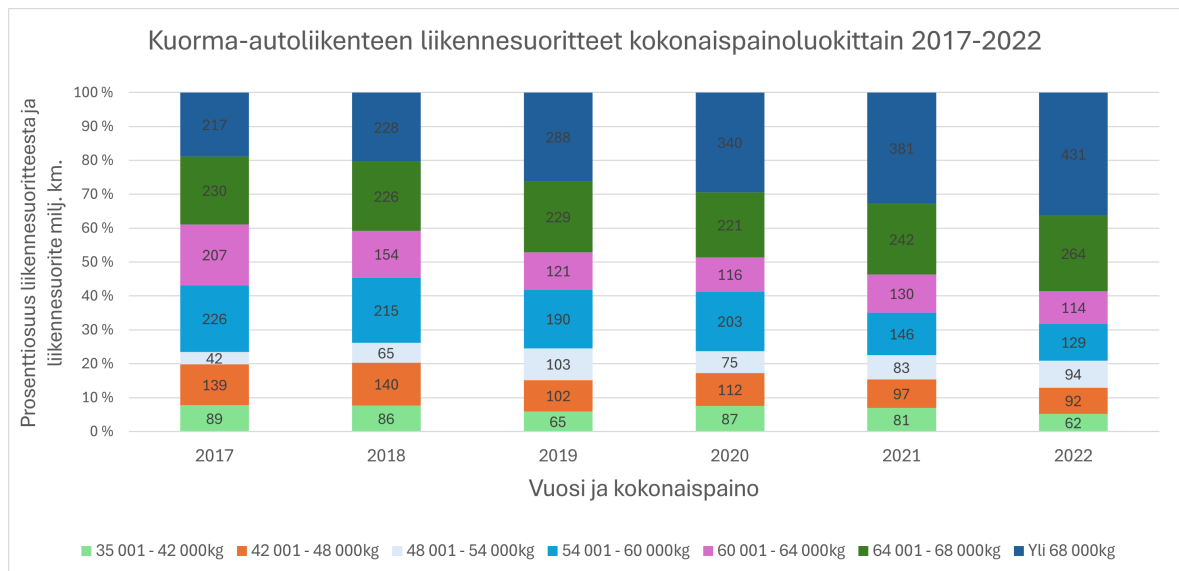
Kuva 9: Valittujen valtateiden LAM-pisteet kartalla.

Raskaan liikenteen sähköistämiseksi täytyy selvittää raskaan liikenteen vuotuinen liikennemäärä valituilla teillä. Liikenteen määrän voi selvittää keräämällä dataa julkisista lähteistä. Tässä tapauksessa data on kerätty Fintrafficin LAM-tilastosta (Fintraffic, 2023b) rajaamalla liikenne aiemmin mainituille teille. Lisäksi dataa kerättyä ajoneuvot on rajattu puoli- ja täysperävaunullisiin kuorma-autoihin sekä HCT-kuorma-autoihin (High-capacity Transport). High-Capacity Transport eli suomeksi korkean kapasiteetin kuorma-autolla tarkoitetaan kuorma-autoa, jonka kokonaispaino voi olla maksimissaan jopa 104 000 kg ja pituus 34,50 m (Liimatainen, Pöllänen & Nykänen, 2020).

Data on kerätty suunnat ja kaistat summattuina, eli liikennemäärät ovat molemmansuuntaisen liikenteen summat. Julkisista lähteistä ladatun datan perusteella on laskettu raskaan liikenteen keskiarvollinen määrä valituilla teillä. Liikenteen keskiarvollisen määrän avulla voidaan laskea suuntaa antava luku tarvittavalle latauskapasiteetille.

3.1 Raskaan liikenteen määrä vuosien varrella

Raskaan liikenteen tuonnin kuljetukset keskittyvät yhä enenevässä määrin Helsingin, Turun ja Tampereen väliselle alueelle ja vientikuljetuksetkin pääteille. Raskaan liikenteen määrän kasvu kohdistuu erityisesti Etelä-Suomen pääteille. (Traficom, 2023) Tähän syynä on suurten teollisuuskeskittymien, satamien ja lentokenttien sijoittuminen juuri pääkaupunkiseudun sekä muiden Suomen suurten kaupunkien läheisyyteen.



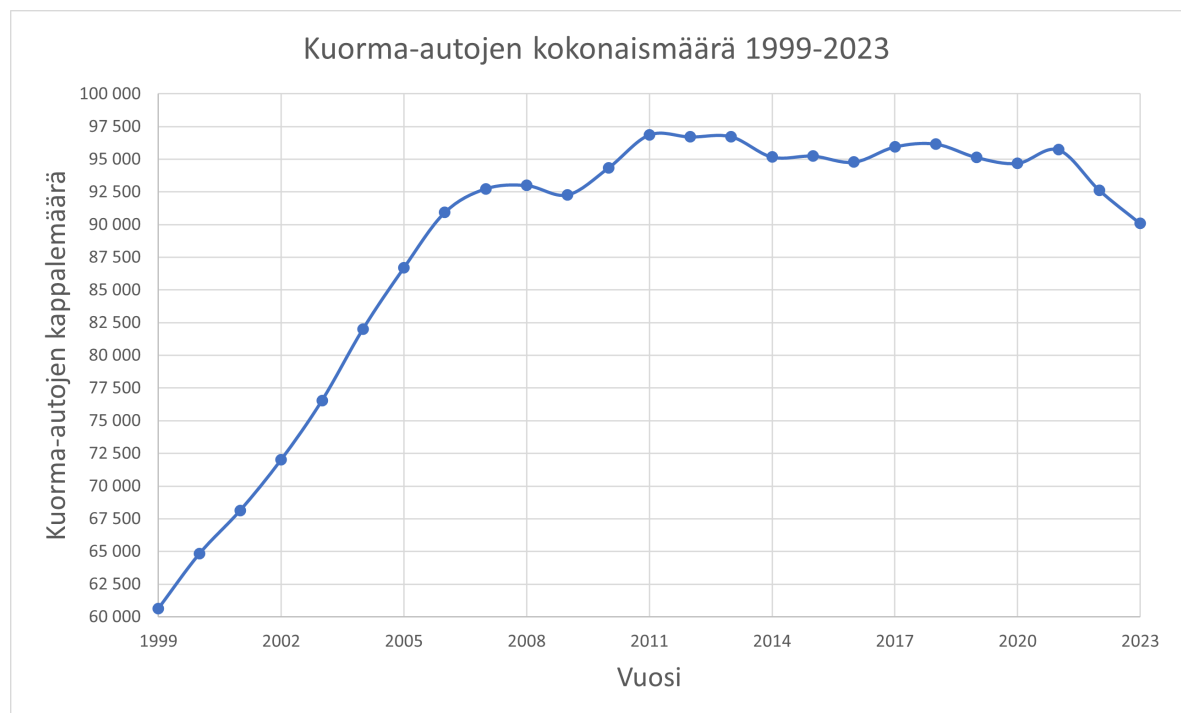
Kuva 10: Liikennesuorite ajoneuvojen kokonaispainojen mukaan vuosilta 2017–2022. Pylväsdiagrammin pylväissä on merkattu painoluokan kokonaisliikennesuorite vuodessa miljoonissa kilometreissä. Kuvaajasta huomataan, kuinka vuonna 2022 yli 60 000kg kokonaispainoltaan olevien kuorma-autojen määrä oli noin 65 % kaikesta kokonaispainoltaan yli 35 000 kg:n kuorma-autoliikenteestä valituilla valtateillä eli sen määrä on kasvanut noin 10 % vuodesta 2017.

Kuvassa 10 on esitetty kuorma-autoliikenteen suoritteet miljoonissa kilometreissä kokonaispainoluokkien mukaan suhteessa toisiinsa. Kuvaajasta huomataan, kuinka yli 64 000 kg kokonaisuomassaltaan oleva raska liikenne on lisääntynyt viime vuosina eniten verrattuna muuhun kuorma-autoliikenteeseen. Liikennesuorite kuvaa tavarankuljetuksessa ajettujen kilometrien määrää. Kuvaaja pohjautuu Tilastokeskuksen julkiseen dataan. (Tilastokeskus, 2023a) Yli 64 000 kg kokonaispainoltaan olevia kuorma-autoja oli vuonna 2022 noin 700 kappaletta. Vuoden 2023 tietoja ei ollut vielä saatavilla.

Logististen toimintojen vähentyminen vuoden 2022 ensimmäisessä ja toisessa neljänneksessä voidaan selittää Venäjän hyökkäyssodan alkamisella, jolloin logistinen liikenne Venäjältä Suomeen loppui. Euroopan Unionin asettamat pakotteet hyökkäyssodan alettua vaikuttivat myös muualta maailmasta aiemmin sallittuihin tuontitarvikkeisiin, joiden tuonnin loppuminen selittää osaltaan myös liikenteen vähentymistä. Vuoden 2022 loppuun mennessä raskaan liikenteen suoritteiden määrä nousi taas normaalille tasolle, mutta on vähentynyt vuoden 2023 alusta lähtien vaikka raskaan liikenteen kaluston määrä on kasvanut. Kuvasta huomataan myös koronaviruksen aiheuttama raskaan liikenteen määrän väheneminen vuoden 2020 ensimmäisessä neljänneksessä.

Raskaan liikenteen määrä on ollut selvästi nouseva vuosina 1995–2016. Laskuvuosia ja voimakkaitakin pudotuksia on kuitenkin esiintynyt. Vuodesta 1995 vuoteen 2015 kokonaismäärä on kasvanut 19 % eli vuositasolla keskimäärin 0,9 %. Maanteillä kokonaiskasvu oli 20 %. Vuosina 2016–2019 raskaan liikenteen tilastoitu liikennemäärä väheni 4,5 % ja vuosina 2020–2022 raskaan liikenteen liikennemäärä väheni yhteensä noin 3,3 %. Tämä pudotus voidaan osittain selittää koronaviruksen ja Venäjän ja Ukrainan välisen sodan komplikaatioiden takia.

3.2 Kuorma-autojen määrä Suomessa



Kuva 11: Autoalan tiedotuskeskuksen 12.1.2024 päivittämä ajoneuvokannan otanta kaikkien kuorma-autojen määrästä Suomessa. (Autoalan tiedotuskeskus, 2023)

Kaikkien Suomen rekisterissä olevien liikennekelpoisten kuorma-autojen määrä 12.1.2024 on esitetty kuvassa 11. Tasan tarkka luku on 90 086 kappaletta ja kuorma-autojen määrä käyttövoimittain on esitetty seuraavassa taulukossa 2. Kuvissa 12 ja 11 ei ole erikseen eritelty kuorma-autojen määrää kokonaispainoluokittain, sillä tietoja kuorma-autojen määristä liikenteessä ajoneuvojen painoluokittain ei löytynyt. Näissä tiedoissa kuorma-autot ovat määriteltä kaikki raskaaksi liikenteeksi, jotka eivät ole linja-autoja eikä työkoneita.

Taulukko 2: Autoalan tiedotuskeskuksen 12.1.2024 päivittämästä ajoneuvokannan otannasta kaikkien kuorma-autojen määrästä Suomessa käyttövoimittain. (Autoalan tiedotuskeskus, 2023)

Vuosi	Bensiini	Diesel	Sähkö	Lataushybridi	Metaani	Etanoli	Muu	Yhteensä
2014	1340	93 621	0	0	73	55	87	95 176
2015	1401	93 619	1	0	79	65	85	95 250
2016	1452	93 076	1	0	81	66	104	94 780
2017	1485	94 168	1	0	99	79	116	95 948
2018	1559	94 317	2	0	131	98	62	96 169
2019	1764	93 000	2	0	177	106	92	95 141
2020	2096	93 132	7	0	295	118	54	95 702
2021	2145	92 041	9	0	393	119	64	94 771
2022	2248	89 691	25	0	488	120	61	92 633
2023	2354	86 896	65	5	579	131	56	90 086

Taulukosta 2 nähdään kuorma-autojen määrä Suomessa käyttövoimittain. Eniten liikenteessä vuonna 2023 on ollut diesel-käyttöisiä kuorma-autoja (96,5 %) ja toiseksi eniten bensiinikäyttöisiä kuorma-autoja (2,6 %). Sähköisten kuorma-autojen määrä on vain 0,07 % kaikista kuorma-autoista. Kuvasta 11 ja taulukosta 2 huomataan, kuinka kuorma-autojen määrä Suomessa on laskenut vuoden 2018 jälkeen lähes 6000 kappaletta.

3.3 Raskaan sähköisen liikenteen vähäisyys Suomessa ja siihen vaikuttavat tekijät

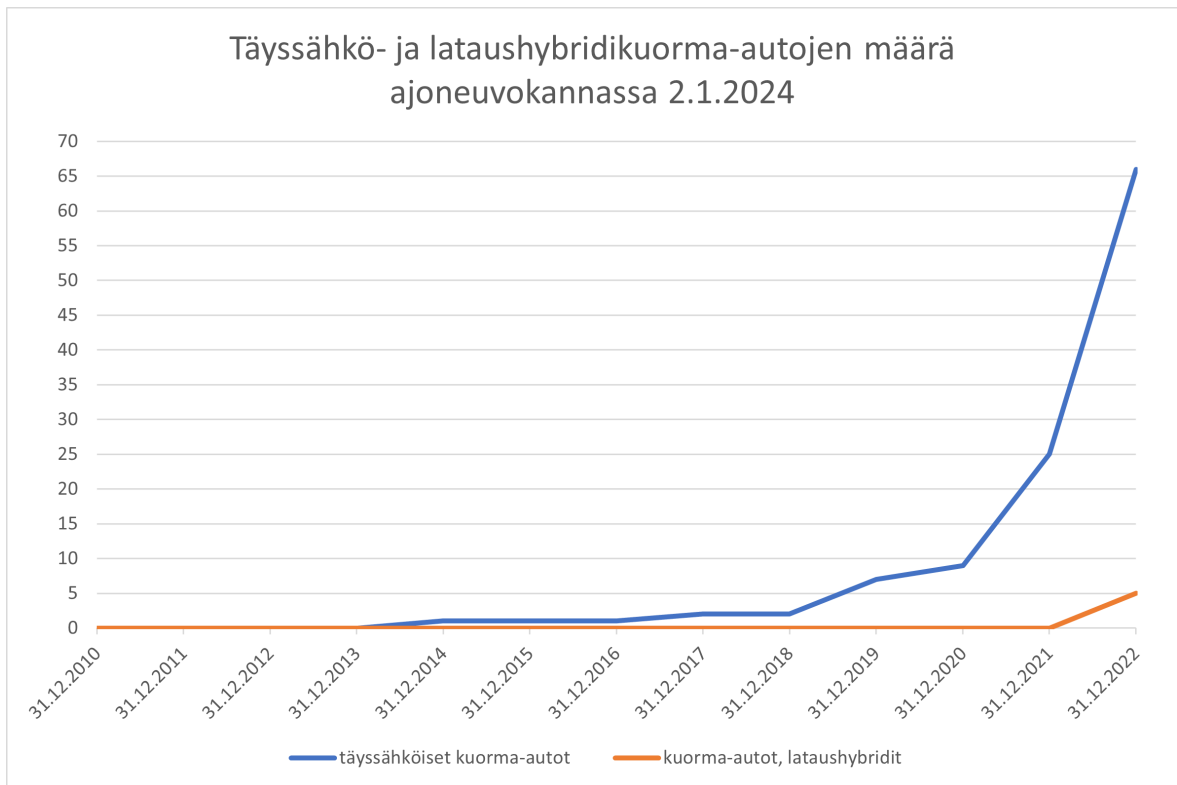
Suomessa on vielä nykyisellään erittäin vähän täyssähköistä raskasta liikennettä. Tämä voidaan varmasti osittain selittää Suomen vaihtelevilla sääolosuhteilla, jotka heikentävät sähköajoneuvojen toimintasädeettä esimerkiksi kylmissä talviolosuhteissa. Tutkimukset osoittavat, että sähköajoneuvojen optimaalinen toimintaympäristö lämpötilan näkökulmasta on 21,5°C (Steinstraeter, Heinrich & Lienkamp, 2021). Suomessa erityisesti pakkasen vaikutus sähköajoneuvojen toimintasäteeseen arveluttaa.

Steinstraeter, Heinrich & Lienkamp, 2021 on tutkimuksessaan esittänyt, että esimerkiksi Tesla Model S -henkilöauton tehonkulutus nousee jopa 45 % vain -10°C pakkasessa, joka voidaan osaltaan olettaa menevän lämmitykseen. Samanlaista tutkimustietoa ei vielä löytenyt raskaan sähköisen liikenteen ajoneuvoista, mutta kuorma-auton kabiinin voidaan ajatella olevan lähes yhtä suuri kuin mitä henkilöauton sisätilat ovat. Kuorma-auton energiankulutuksessa kabiinin lämmitys ei näy suhteessa yhtä suurena kuin henkilöautossa, mutta on silti otettava huomioon. Ylimääräinen energiankulutus vaikuttaa heti toimintasäteeseen.

Suomessa pakkaset voivat laskea kovimmillaan lähes -40°C, joten sähköajoneuvojen tehonkulutuksen kovaan nousuun pakkasilla täytyy saada jokin ratkaisu erityisesti Pohjois- ja Keski-Suomen pitkiin ja kylmiin talviin. Etelä-Suomessa kovat pakkaset eivät niinkään tuota ongelmia ja suurin osa yhteiskunnan toiminnoista ja asukkaista painottuu juuri Etelä-Suomeen. Sähkömoottorin huomattavasti yksinkertaisempi rakenne polttomoottoriin nähden antaa sille etulyöntiaseman luotettavuudessa myös pakkasella.

Toinen merkittävä sähköisen raskaan liikenteen yleistymistä hidastava tekijä on yksinkertaisesti kuorma-autoille riittävän suuritehoisen latausinfrastruktuurin eli latausverkoston puuttuminen. (Liikenne ja viestintäministeriö, 2023) Latausverkostoa ei ole vielä riittävässä määrin, jotta olisi kannattavaa yhtiöille hankkia sähköä käyttövoimanaan hyödyntäviä kuorma-autoja. Henkilöajoneuvojen pikalatauspisteetkin on vasta viime vuosien aikana alkanut lisääntymään, ja tämä prosessi on vieläkin kehitysvaiheessa. 1 MW:n latauspisteitä on jo esimerkiksi Lempäälässä, mutta niitä tarvitaan lisää ympäri Suomea.

Täyssähkökuorma-autojen hankintaa on tuettu valtion hankintatuella jo monta vuotta ja on voimassa ainakin vuoden 2024 loppuun saakka. Hankintatuki kattaa sähkökuorma-autoilla 10–25 % prosenttia hintaerosta dieselkäyttöiseen kuorma-autoon nähden. (Liikenne ja viestintäministeriö, 2023)



Kuva 12: Autoalan tiedotuskeskuksen 12.1.2024 päivittämä ajoneuvokannan otanta täyssähkö- ja hybridikuorma-autojen määrästä Suomessa. (Autoalan tiedotuskeskus, 2023)

Kuten kuvasta 12 huomataan, on raskaan sähköisen liikenteen määrä Suomessa vielä toistaiseksi erittäin vähäistä. Vuoden 2024 tammikuussa täyssähköisiä kuorma-autoja on 65 kappaletta ja lataushybridikuorma-autoja vain viisi kappaletta. Kuitenkin on havaittavissa positiivinen trendi sähköisten kuorma-autojen kasvussa, sillä vuodesta 2021 vuoteen 2022 sähköisten kuorma-autojen määrä yli kaksinkertaistui 25 kappaleesta 65 kappaleeseen. Samalla huomataan, että lataushybridiversiot kuorma-autoista eivät ole kovin suosittuja, sillä ensimmäiset saapuivat Suomeen vasta vuonna 2022.

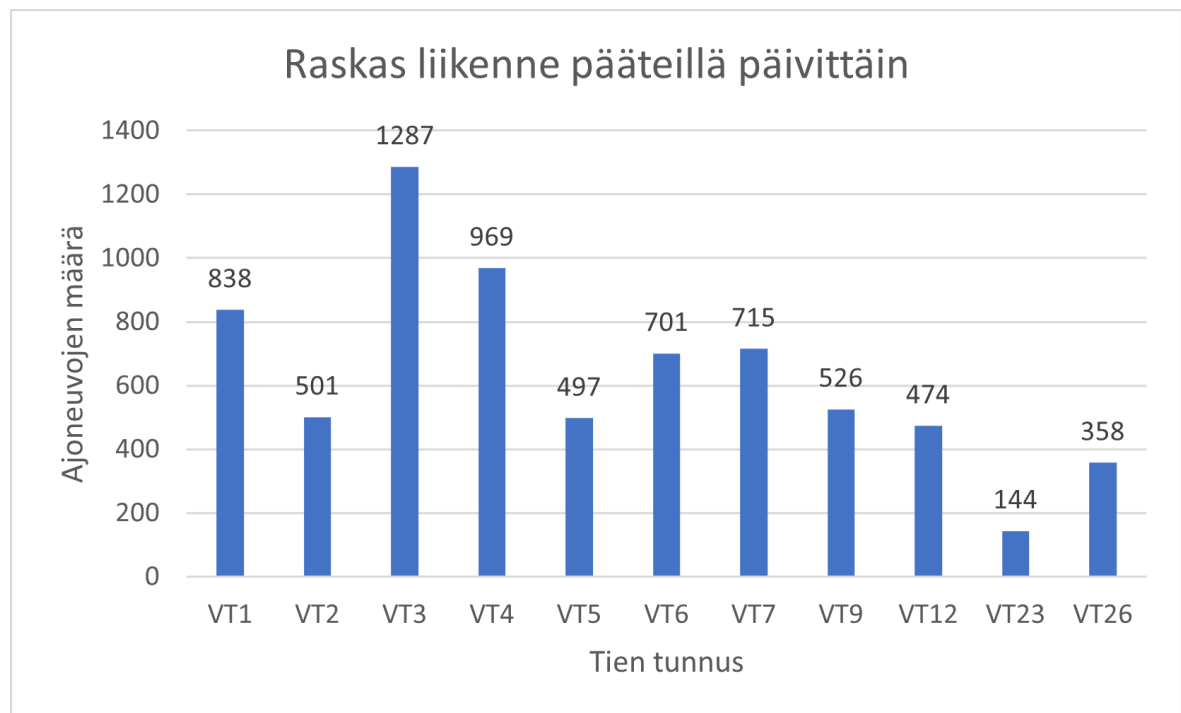
4 Raskaan liikenteen sähköistäminen asteittain

Raskaan liikenteen sähköistäminen on tehtävä asteittain, jotta sähköisten kuorma-autojen ylläpitäminen ja käyttöönotto onnistuu ilman latausongelmia ja sähköverkon ylikuormituksia. Tarvittavan latauskapasiteetin määrää voidaan arvioida eri valtateilla, kun tiedetään valtateiden keskiarvolliset liikennemäärät päivässä. Perustuen taulukkoon 2, jossa on esitetty vuoden 2023 kuorma-autojen kokonaismäärä käyttövoimatyypeittäin sekä kaikki yhteensä, voidaan laskea paljonko sähköistymisasteet 10 %, 50 % ja 100 % on kuorma-autojen kappalemääränä.

Taulukko 3: Kuorma-autojen määrät sähköistymisasteittain 10 %, 50 % ja 100 %. Taulukossa ei ole eritelty kuorma-autoja painoluokittain.

Kokonaismäärä	Sähköistymisaste	Sähköisten ajoneuvojen määrä
90 086	10 %	9009
	50 %	45 043
	100 %	90 086

Yllä olevasta taulukosta 3 nähdään Suomen kuorma-autojen kokonaismäärä vuonna 2023 ja kokonaismäärä suhteutettuna sähköistymisasteisiin. Jos 10 % Suomen kuorma-autoista olisi sähköistettyjä, olisi kokonaisuudessaan sähköisiä kuorma-autoja noin 9009 kappaletta, jos taas 50 % niin sähköisiä kuorma-autoja olisi noin 45 043 kappaletta.



Kuva 13: Raskaan liikenteen määrän keskiarvo valtateilla päivittäin vuodessa (Fintraffic, 2023a)

Valittujen valtateiden päivittäiset kuorma-autoliikenteen keskiarvolliset määrät ovat esitetty kuvassa 13. Todelliset liikennemäärät voivat poiketa esitetyistä luvuista riippuen viikonpäivästä ja vuodenajasta. Kuvasta voidaan päätellä, että keskiarvollisesti päivittäin valtatiellä 3 kulkee eniten raskasta liikennettä. Valtatie 3 kulkee Uudenmaan, Kanta-Hämeen, Pirkanmaan, Etelä-Pohjanmaan ja Pohjanmaan kautta Helsingistä kohti Vaasaa. Tämän valtatievarrella sijaitsee muitakin suuria kaupunkeja, kuten Vantaa, Tampere, Hämeenlinna, Hyvinkää ja Nokia. Seuraavaksi eniten liikennettä kulkee valtatiellä 4, joka kulkee Helsingistä Utsjoelle. Valtateilla 6 ja 7 kulkee lähes yhtä paljon raskasta liikennettä verrattuna toisiinsa. Valtatiellä 1, joka kulkee Helsingistä Turkuun, kulkee kolmanneksi eniten raskasta liikennettä keskiarvollisesti päivittäin. Valtatie 6 kulkee Koskenkylästä, Kouvolan, Lappeenrannan ja Joensuun kautta Kajaaniin ja valtatie 7 kulkee Helsingistä Kotkan kautta Vaalimaalle. Valtatie 7 on merkittävä kulkuyhteys Venäjältä Pietarista Helsinkiin. Liikennemäärä kyseisellä valtatiellä on vähentynyt erittäin paljon Venäjälle asetettujen pakotteiden takia.

Taulukko 4: Kuorma-autojen keskiarvomäärä päivittäin eri valtateilla ja määrä suhteutettuna sähköistymisasteeseen, perustuu kuvaan 13 (lkm = lukumäärä).

Valtatie	Keskiarvo/Päivä	Aste 10 % (lkm)	Aste 50 % (lkm)	Aste 100 % (lkm)
1	807	81	404	807
2	501	50	251	501
3	1200	120	600	1200
4	969	97	485	969
5	497	50	249	497
6	701	70	351	701
7	715	72	358	715
9	526	53	263	526
12	474	47	237	474
23	144	14	72	144
26	358	36	179	358

Valtateiden raskaan liikenteen sähköistämistä sähköistymisasteilla 10 %, 50 % ja 100 % voidaan suunnitella poimimalla raskaan liikenteen määrä kyseisellä valtatiellä päivittäin ja laskea taulukon 4 tavoin sähköisten ajoneuvojen määrä kullakin sähköistymisasteella. Näiden tietojen avulla voidaan suunnitella tarvittavaa latauskapasiteettia jokaiselle valtatielle. Tämä tutkimus antaa vain arvion tällä hetkellä saatavien tietojen perusteella, sillä todellisuudessa raskaan liikenteen määrä valtateilla vaihtelee päivittäin. Käytössä on vain keskiarvot antavaa dataa, jonka perusteella arvioidaan liikennettä.

Jos sähköisten kuorma-autojen määrää Suomessa vuonna 2023 (kuva 11) verrataan eri sähköistymisasteiden sähköisten kuorma-autojen määrään (taulukko 3), ollaan vielä kaukana tavoitteesta. Vaikka raskaan liikenteen sähköistämisessä on huomattavissa positiivinen ja kasvava trendi, vaaditaan silti huomattava määrä tutkimusta, jotta sähköiset raskaat ajoneuvot,

joiden toimintasäde ja käytettävyys ylittää samaan kuin nykyisillä polttomoottorivaihtoehdoilla kuorma-autoilla.

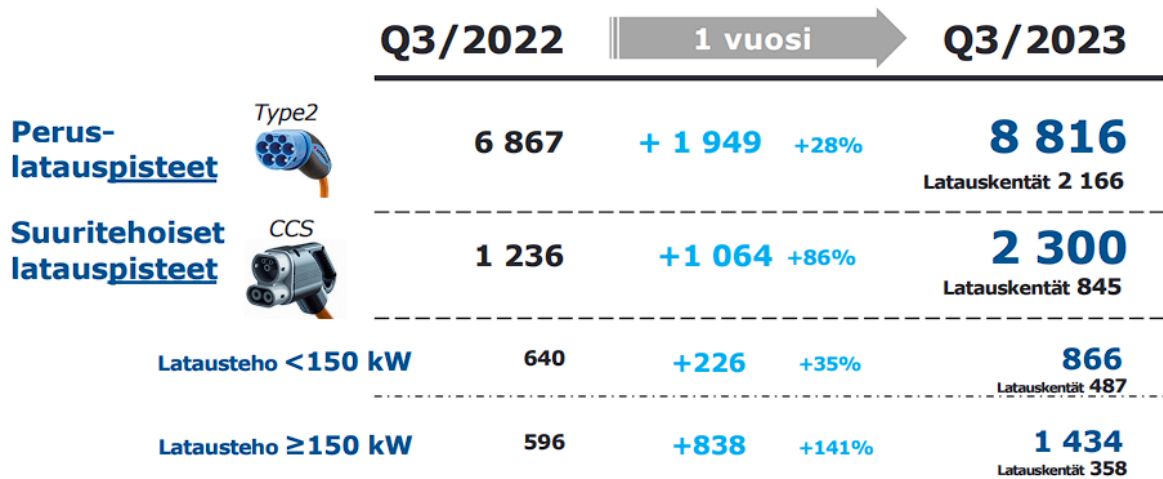
Taulukossa 3 ja kuvassa 13 keskiarvolla lukumäärällä/päivä tarkoitetaan siis kuorma-autojen lukumäärän keskiarvoa päivässä kyseisellä valtatiellä vuoden ajan. 10 % sähköistymisasteella pelkästään tähän tutkimukseen valituilla valtateilla kulkisi yhteensä 690 sähköistä kuorma-autoa päivässä, 50 % sähköistymisasteella yhteensä 3449 sähköistä kuorma-autoa päivässä ja 100 % sähköistymisasteella lähes 7000 sähköistä kuorma-autoa päivässä. Liikenne- ja viestintäministeriön (Liikenne ja viestintäministeriö, 2023) raportissa kerrotaan vuoden 2030 sähkökuorma-autojen tavoitemääräksi 5400 kappaletta ja vuoden 2035 tavoitteeksi 12 200 kappaletta koko Suomen alueella.

Tutkimuksessa ei ole huomioitu muiden tämän tutkimuksen ulkopuolisten valtateiden kuorma-auto määriä eikä ollenkaan linja-autoja, työkoneita ja henkilöautoja, joiden lataustarpeet tulisi myös huomioida sähköverkon kapasiteetissa täydellisen tilanteen simuloimiseksi.

5 Liikenteen määrä ja tarvittava latauskapasiteetti

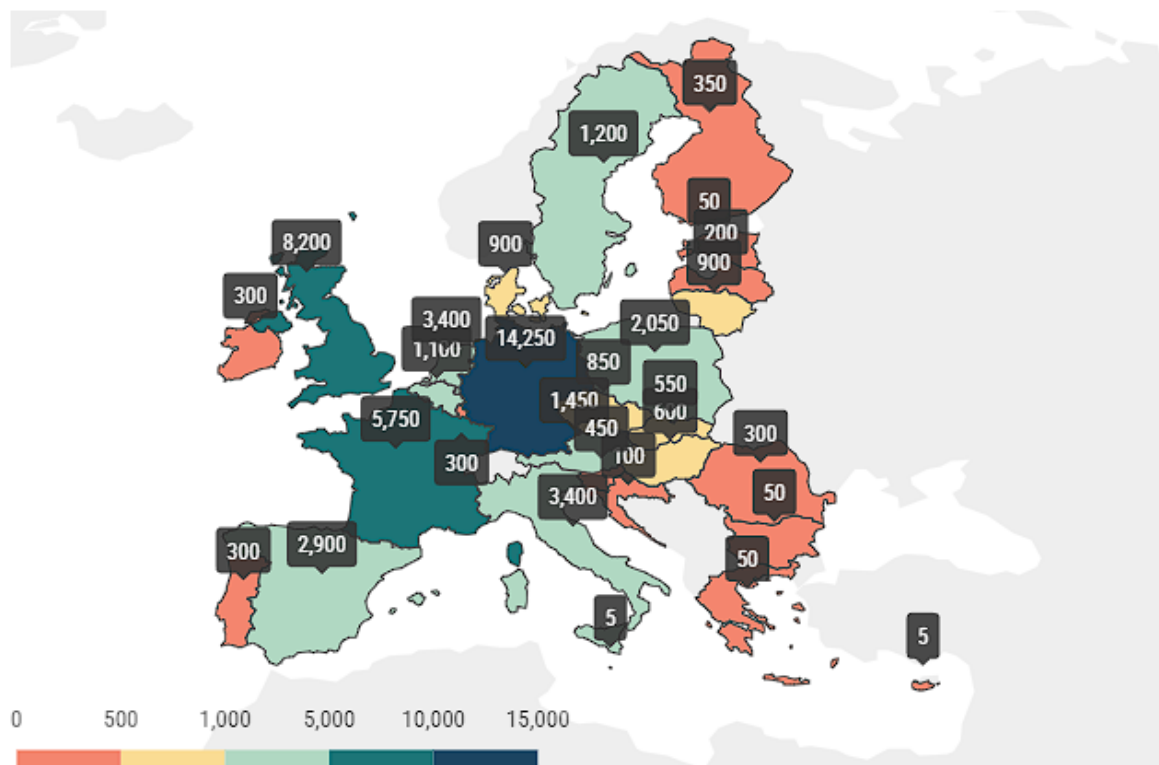
Euroopan Unionin esittämän esityksen mukaan sähköajoneuvojen latausemia tulisi olla 60 kilometrin välein 2020-luvun loppuun mennessä. (Paukkeri, 2022) Vielä nykyisellään latausinfrastruktuuri on keskittynyt maantieteellisesti suurten kaupunkien ympärille, mutta vuoteen 2030 mennessä latausverkon tulisi olla tiheämpää ympäri Suomen. Ylen artikkelin (Paukkeri, 2022) mukaan juuri suurteholatausverkostossa on kehitettävää ja vuoteen 2030 mennessä uusia latausasemia tulisi rakentaa 50–60 kappaletta lisää.

Latausverkoston kehitys, Latauspaikat ja -pisteet



Kuva 14: Latausverkoston kehitys, latauspaikat ja -pisteet. (E-mobility, 2023)

Vuoden 2023 marraskuussa Suomessa oli 2300 suurteholatauspistettä, josta 866 latauspistettä oli teholtaan vähintään 150 kW:a. Tämä määrä tarkoittaa, että Suomessa on yksi 150 kW:n suurteholatauspiste lähes 105:tä kuorma-autoa kohti, kun kuorma-autojen kokonaismäärä oli 90 086 vuonna 2023. Suhdeluku raskaiden ajoneuvojen ja suurteholatauspisteiden välillä on erittäin huono, kun sen täytyisi olla lähemmäs alle kymmentä ajoneuvoa yhtä latauspistettä kohden. Teholtaan 1 MW:n tai 350 kW:n latauspisteiden määrästä ei ole tarkkaa tietoa, mutta niitä tiedetään olevan esimerkiksi Lempäälässä ja Vantaalla.

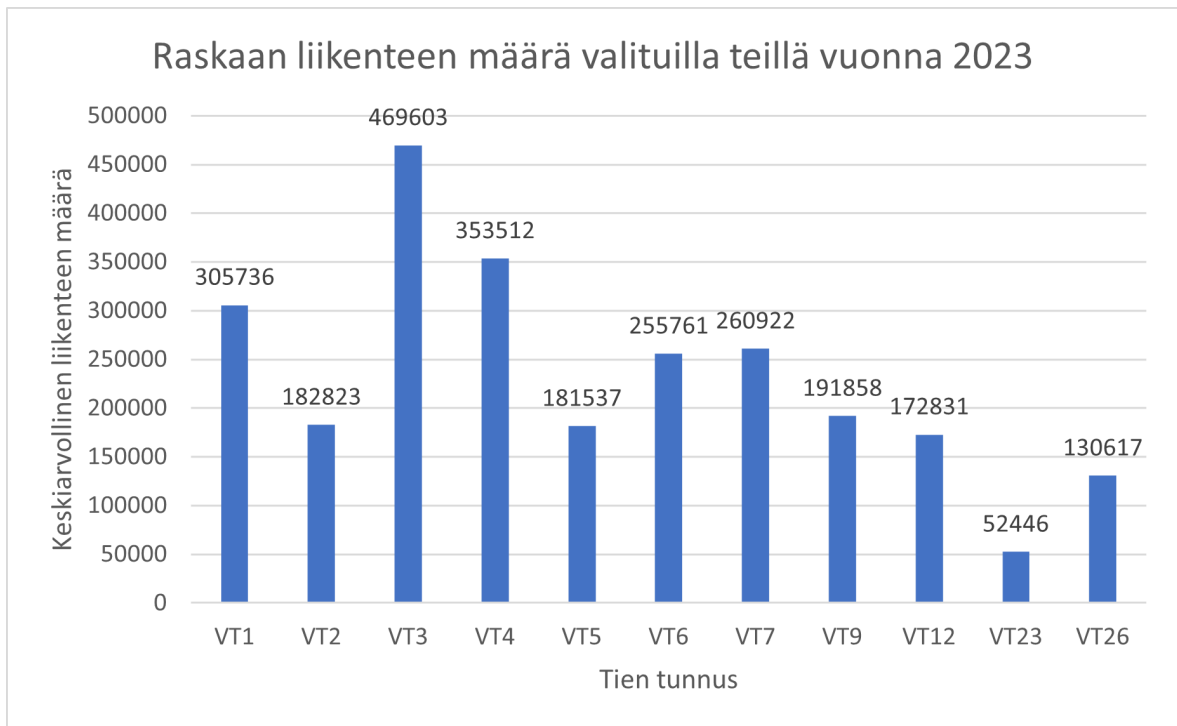


Kuva 15: ACEA, 2021 ennuste Euroopan maiden vaatimasta kuorma-autojen latauspisteiden määrästä vuonna 2030.

Kuvan 15 ennusteen mukaan Suomessa tarvitaan 350 latauspistettä pelkästään kuorma-autoille vuoteen 2030 mennessä. Kuvasta huomataan myös, että Suomessa tarvittavien latauspisteiden määrä verrattuna muihin Euroopan maihin on erittäin vähäistä. Esimerkiksi naapurimaassa Ruotsissa tarvitaan ennusteen mukaan lähes 3,5 kertaa enemmän latauspisteitä vuonna 2030.

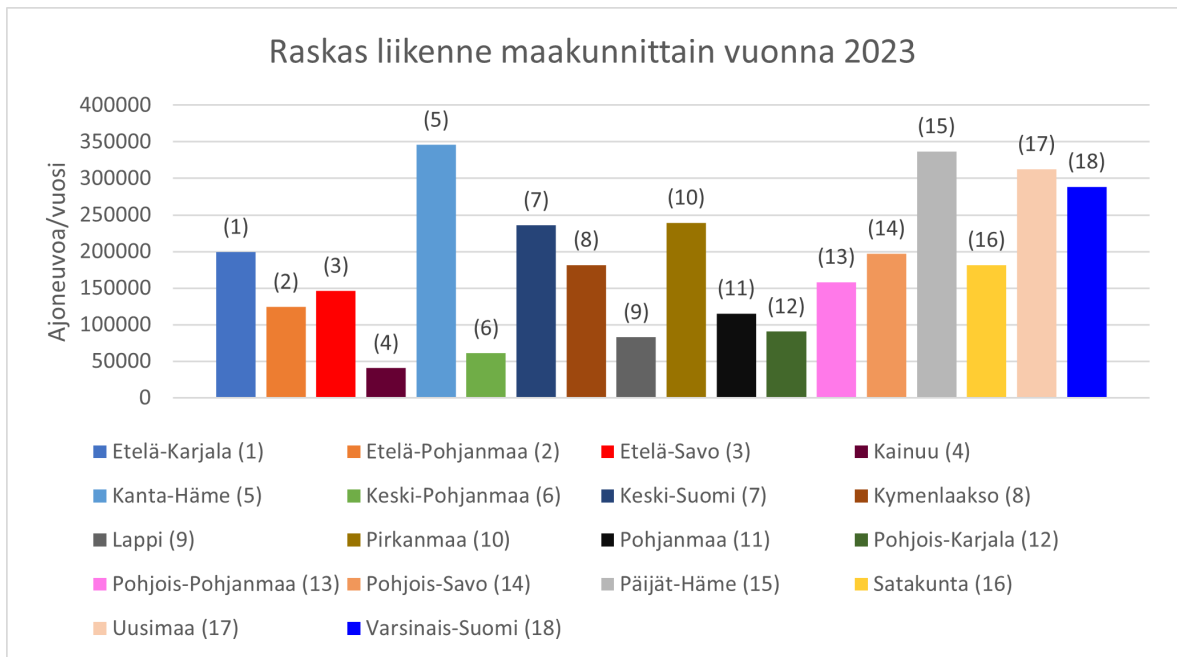
Raskaan liikenteen määrä valituilla valtateilla vuoden 2023 aikana on yhteensä yli 2,5 miljoonaa kuorma-autoa. Luku sisältää myös muutkin kuin Suomen rekisterissä olevat kuorma-autot. Tämän perusteella voidaan arvioida tarvittava latauskapasiteetti jos 10 %, 50 % tai 100 % kuorma-autoliikenteestä korvattaisiin sähköllä toimivilla kuorma-autoilla. Liikennemääriä huomioidessa täytyy muistaa, että kerätyn datan avulla lasketut liikennemäärät ovat keskiarvollisia.

On myös hyvä huomioida, että HCT-kuorma-autojen data oli puutteellista. Syy datan puutteellisuuteen voi olla, että kaikki mittauspisteet eivät tunnista tämän tyyppin kuorma-autoja, sillä LAM-anturit eivät mittaa ajoneuvon massaa. On myös mahdollista, että puutteellinen data HCT-kuorma-autoista johtuu niiden vähäisestä määrästä liikenteessä eli niitä ei välttämättä liiku vielä jokaisella valtatiellä. Kuvasta 16 voidaan myös tarkastella kuorma-autoliikenteen alueellista jakaumaa, kun pohditaan latausasemien sijoittelua.



Kuva 16: Raskaan liikenteen määrä valituilla päteillä vuonna 2023. Y-akselilla valtateillä mittauspisteiden ohi kulkeneiden raskaiden ajoneuvojen kappalemäärä ja x-akselilla valtatie (VT). (Fintraffic, 2023a)

Liikenteen alueellisen jakauman selvittämiseksi voidaan myös tarkastella Fintrafficilta kerättyä dataa maakunnittain. Tarkasteluun valitaan kaikki suomen maakunnat pois lukien Ahvenanmaa. Tarkastelu on rajattu puoli- ja täysperävaunullisiin sekä HCT-kuorma-autoihin vuonna 2023. Liikenteen maakunnittain jaottelussa on huomioitu kaikki maakunnassa olevat mittauspisteet.



Kuva 17: Raskaan liikenteen määrä maakunnittain vuonna 2023. (Fintraffic, 2023a)

Jos tarkastellaan kuvaa 17, eniten liikennettä on Kanta-Hämeessä, Päijät-Hämeessä ja Uudellamaalla, jossa jokaisessa maakunnassa liikkui yli 300 000 kuorma-autoa vuoden 2023 aikana. Merkittäviä määriä raskasta liikennettä oli myös Varsinais-suomessa, Pirkanmaalla ja Keski-Suomessa. Etelä-Karjalassa ja Kymenlaaksossa on lähimpänä Helsinkiä olevat Venäjän rajanylityspaikat. Tämä on osasy miksi niissäkin oli liikkunut noin 200 000 kuorma-autoa vuoden 2023 aikana. On huomioitava, että tavaraliikenne Itä-Suomessa on vähentynyt Suomen ja Venäjän välisen rajan sulkeutumisen takia.

Tilastot vahvistavat aikaisemman väitteen, että raskas liikenne keskittyy Etelä-Suomen ja länsirannikon alueelle. Päijät-Hämeen alueella liikkuu suuri määrä raskasta liikennettä, sillä se on maantieteelliseltä alueeltaan suosittu, kun kuljetetaan kuormaa kohti Itä- ja Keski-Suomea, koska sen kautta kulkee valtatie 4, 12 ja 24. Näistä valtateista tässä tutkimuksessa oleellisia ovat vain 4 ja 12 ja kuvasta 5 nähdään, että vuonna 2023 valtatiellä 4 kulki toiseksi eniten raskasta liikennettä verrattuna muihin valittuihin valtateihin. Valtatie 4 on Suomen pisin valtatie, joka kulkee Helsingistä Utsjoelle, joten tulos ei yllätä. Kuvan 17 mukaan latausinfrastruktuuria tarvittaisiin eniten Kanta-Hämeeseen, Päijät-Hämeeseen ja Uudellemaalle.

Muissa maakunnissa liikenne jakautuu melko tasaisesti. Kanta- ja Päijät-Häme ovat niin sanottuja liikenteen kokooja-alueita, sillä siellä sijaitsee suuria liikenteen solmukohtia. Uudellamaalla sijaitsee lentokenttiä, satamia ja logistiikkakeskuksia, joten sinne tarvitaan tiheää latausverkostoa.

Näihin maakuntiin olisi helpompaa saada latausinfrastruktuuria, sillä kaupunkien väliset matkat ovat lyhyitä, noin 60 kilometriä, joka täyttää EU:n asetuksen.

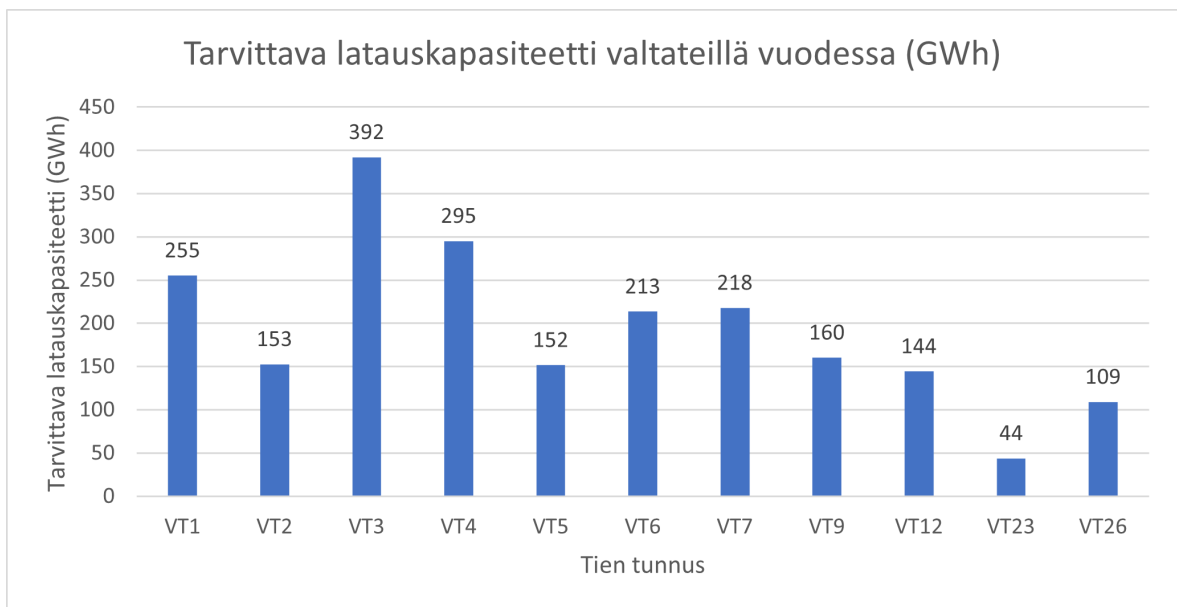
Taulukko 5: Vuoden 2023 kuorma-autojen tarkat liikennemäärät mittauspisteiltä Manner-Suomen maakunnittain. (Fintraffic, 2023a)

Maakunta	Kokonaismäärä
Etelä-Karjala	199 170
Kanta-Häme	345 653
Lappi	82 713
Pohjois-Pohjanmaa	158 172
Uusimaa	312 388
Etelä-Pohjanmaa	124 153
Keski-Pohjanmaa	60 824
Pirkanmaa	239 281
Pohjois-Savo	197 025
Varsinais-Suomi	288 531
Etelä-Savo	145 998
Keski-Suomi	235 763
Pohjanmaa	115 141
Päijät-Häme	336 755
Kainuu	40 556
Kymenlaakso	181 708
Pohjois-Karjala	90 464
Satakunta	181 458

Vähiten raskasta liikennettä kulkee taulukon 16 mukaan Pohjois-Karjalassa, Kainuussa, Keski-Pohjanmaalla ja Lapissa. Nämä ovat ainoat maakunnat Manner-Suomessa, joiden mittauspisteiden ohi kulkee alle 100 000 kuorma-autoa vuodessa. Näitä maakuntia yhdistää, että maakunnan kaupunkien alueilla ei ole suurta teollisuusinfrastruktuuria. Myös asutus on yleisesti paljon harvempaa näillä alueilla.

Suuret latauspuistot ja -asemat eivät välttämättä mahdu enää kasvaviin kaupunkeihin kaupungistuvassa Suomessa. Tällöin latauspuistoille ja -asemille täytyy keksiä vaihtoehtoisia sijoituspaikkoja. Tähän tutkimukseen valittujen valtateiden perusteella valtatie 3 ja sen ympäristö vaatii eniten latausinfrastruktuuria, sillä sitä pitkin kulkee eniten raskasta liikennettä päivittäin ja vuosittain. Nykyisten huoltoasemien yhteyteen voisi olisi helppo integroida latausasemia, sillä niiden yhteyteen voitaisiin rakentaa vain uudet latauslaitteistot, jotka kestävät suuria tehoja ja sähköjakeluverkko, joka kestäisi useiden kuorma-autojen latauksen samanaikaisesti. Valtateiden varsilla on olemassa myös niin sanottuja pysähtymis- tai taukopaikkoja, joiden yhteyteen voisi pystyttää esimerkiksi niin sanottuja hätälatausasemia, jos ajon aikana sattuu toimintahäiriö tai ajoakusta loppuu lataus.

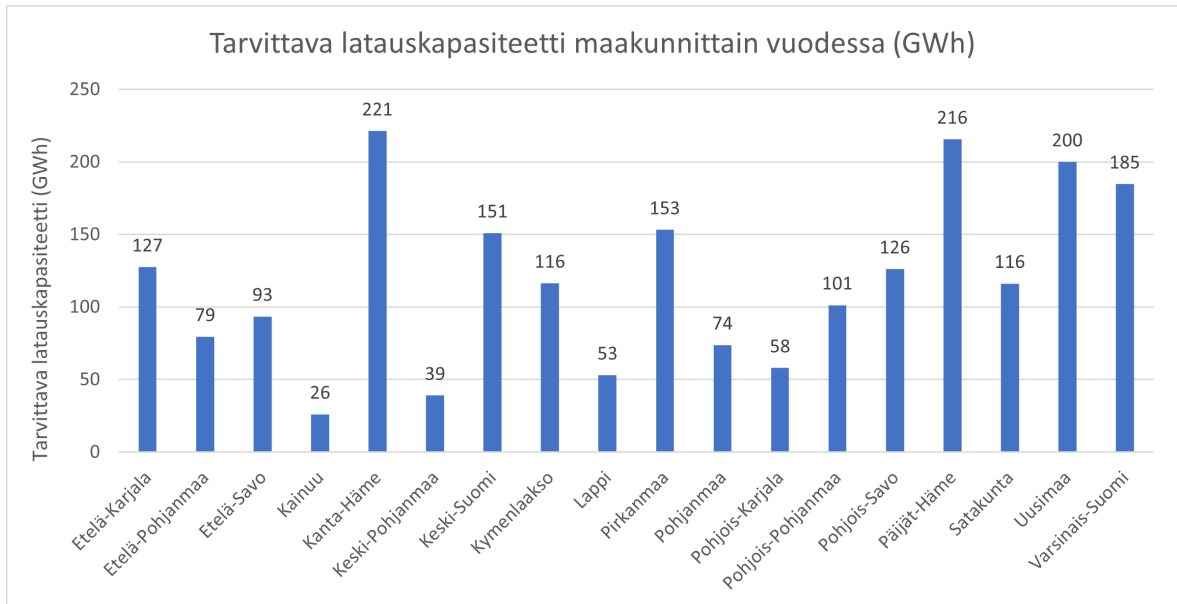
Suomen Kuorma-autojen ajosuoritteen perusteella tarvittava latauskapasiteetti voidaan olettaa laskemalla, kun otetaan tarkasteluun kuorma-auto, jonka ajoakun parametrit tunnetaan. Käytetään tarkastelussa Volvon FH electric kuorma-autoa, jonka suurin sallittu massa on 68 tonnia, akun kapasiteetti on 540 kWh ja toimintasäde on noin 300 km. Kuorma-auto kuluttaa siis noin 1,8 kWh/km. Käytetään tätä arvoa referenssinä analyysissä. Kuorma-autojen ajosuorite vuonna 2022 oli 1186 Miljoonaa kilometriä. 1,8 kWh/km kulutuksella olisi kuorma-autojen lataamiseen tarvittava energiamäärä Suomessa noin 2,1 TWh. Kuvasta 18 voidaan tarkastella tarvittavaa latauskapasiteettia valtateillä, kun kokonaislatauskapasiteetti on jaettu valtateille prosentuaalisesti liikennemäärän mukaan.



Kuva 18: Tarvittava latauskapasiteetti valtateillä vuositasolla, kun kuorma-autojen energiankulutus on 1,8 kWh/km

Kuvasta 18 voidaan todeta, että suurin kapasiteetin tarve on valtateillä 1, 3 ja 4. Kapasiteetistä noin 18 % kuluu valtateillä 3. Kuvaa tarkastellessa on kuitenkin huomioitava, että kapasiteetin laskemiseen on käytetty koko suomen kuorma-autojen ajosuoritetta. Koska tarkastelussa on vain 11 valtatieta, eivät kapasiteetit ole täysin oikeita vaan suuntaa antavia. Myöhemmin tässä luvussa suoritetaan herkkyyshanalyysi, joka paikkaa kuvassa 18 tapahtuneita mahdollisia heittoja.

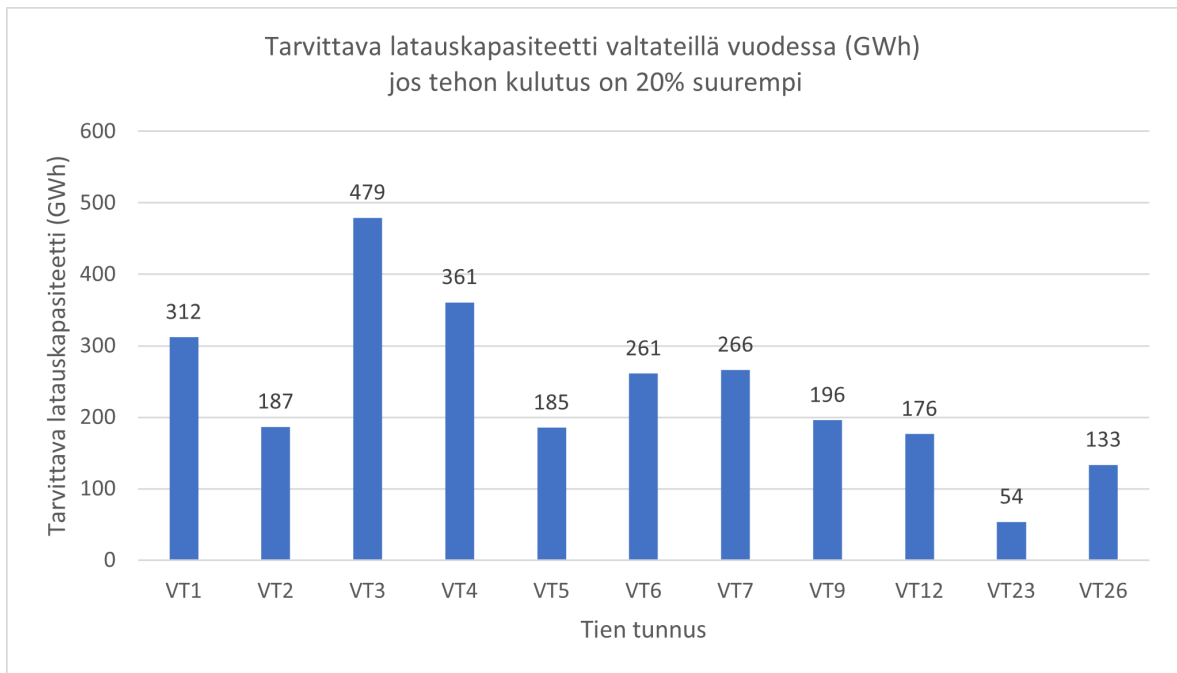
Samoin kuin valtateiden tarkastelussa, voidaan tarvittavaa kapasiteettia tarkastella maakuntatasolla. Kuvassa 19 on esitetty tarvittava latauskapasiteetti gigawattitunteina maakunnittain.



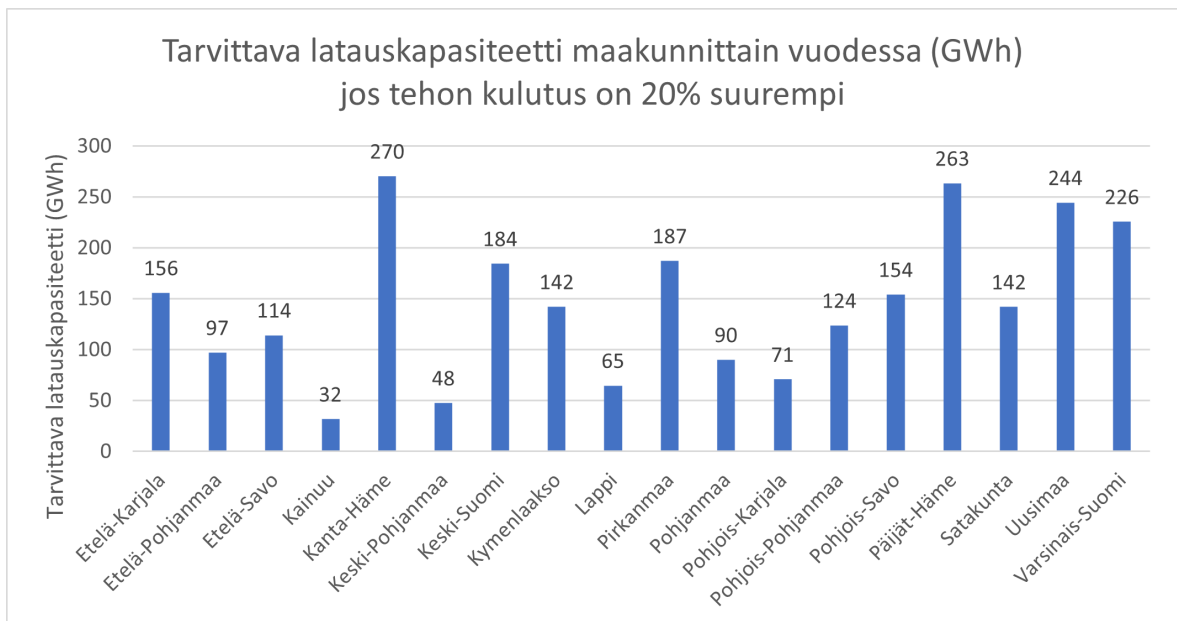
Kuva 19: Vuosittain tarvittava latauskapasiteetti maakunnittain, kun kuorma-autojen energiankulutus on 1,8 kWh/km

Kuvasta 19 huomataan, että suurimmat osuudet eli yli 200 GWh mikä on noin 10 % kapasiteetistä vie Kanta-Häme ja Päijät-Häme. Noin 200 GWh latauskapasiteettia tarvitaan myös Uudellamaalla sekä Varsinais-Suomessa, joiden osuus on koko maan kapasiteetista molemmilla 9 %. Kun verrataan kuvaa 19 liikennemääriin, voidaan todeta että, suurin kapasiteetin tarve on luonnollisesti siellä missä on eniten liikennettä.

Suoritetaan tarvittavalle latauskapasiteetille herkkyysanalyysi. Volvo FH Electric kuorma-auton tehonkulutus on 1,8 kWh/km. Suoritetaan herkkyysanalyysi, jossa kuorma-auton energiankulutus on 20 % pienempi kuin 1,8 kWh/km ja 20 % suurempi kuin 1,8 kWh/km. Tarkastellaan ensin tilannetta jossa energiankulutus on 20 % suurempi. Seuraavissa kuvissa on esitetty tarvittava latauskapasiteetti valtateillä ja maakunnittain.



Kuva 20: Tarvittava latauskapasiteetti valtateillä, kun kuorma-autojen energiankulutus on 2,2 kWh/km

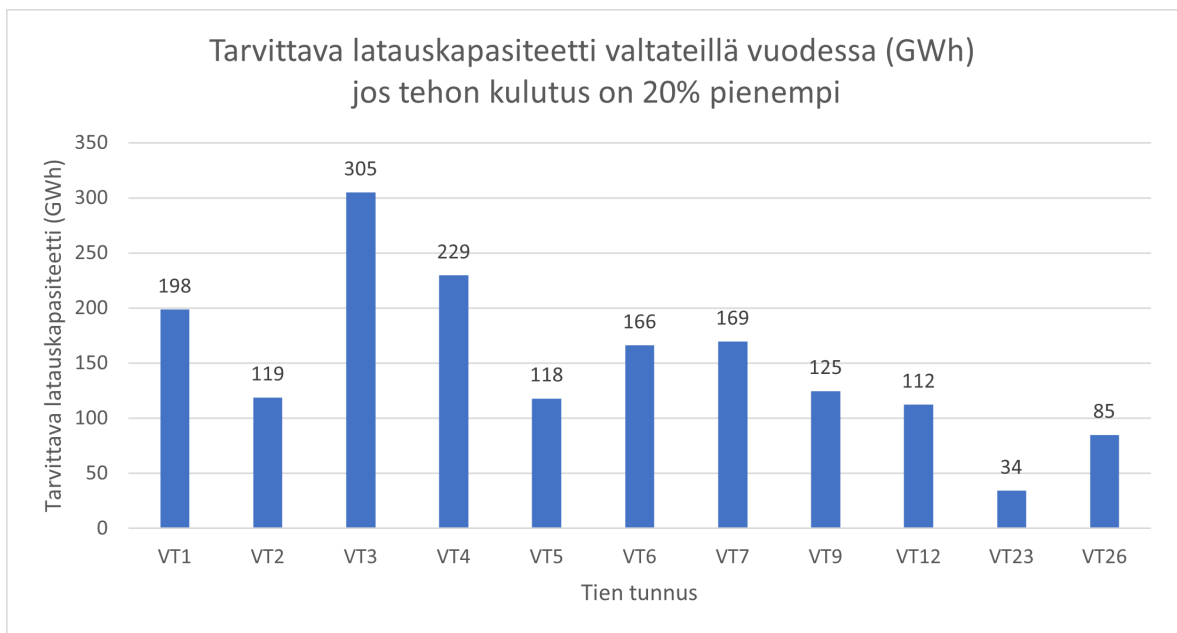


Kuva 21: Tarvittava latauskapasiteetti maakunnittain, kun kuorma-autojen energiankulutus on 2,2 kWh/km

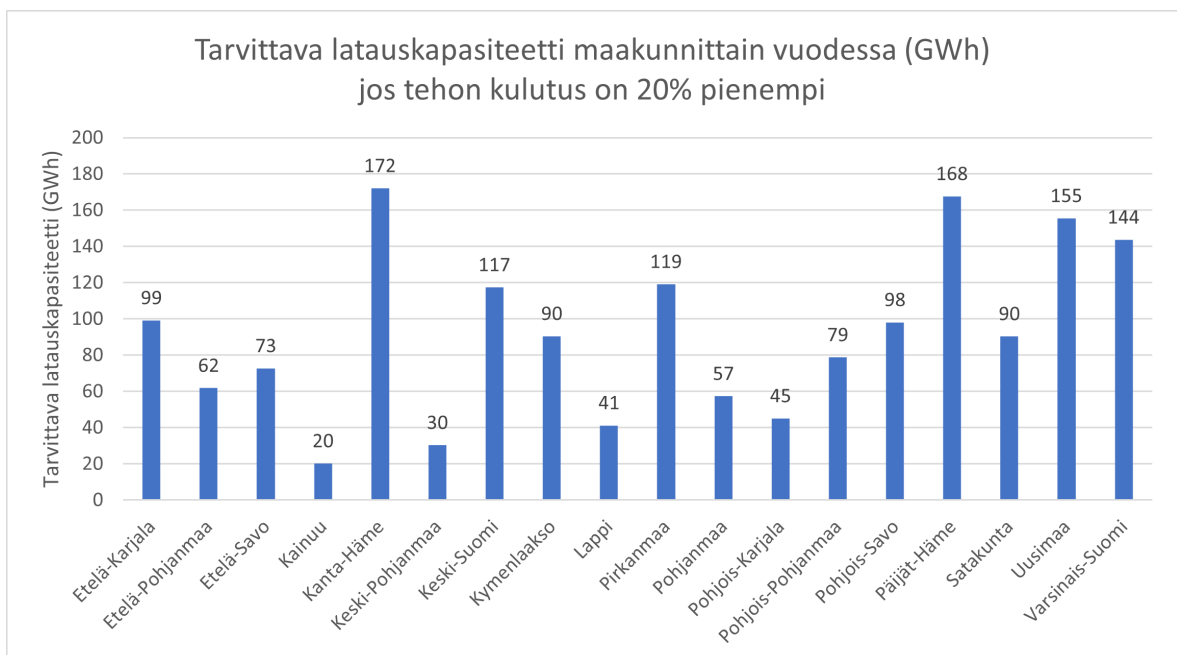
Yllä olevista kuvien 20 ja 21 kuvaajista nähdään tarvittava kapasiteetti valtatie- ja maakunta-kohtaisesti, jos kuorma-auton tehonkulutus olisi keskimäärin 2,2 kWh/km eli noin 20 % suurempi. Kuvaajien perusteella voidaan todeta, että suurin latauskapasiteetti tarvittaisiin valtatielle 3, noin 479 GWh vuodessa. Maakunta-kohtaisesti eniten latauskapasiteettia tarvittaisiin Kanta-Hämeeseen, 270 GWh vuodessa. Jos tehonkulutus olisi kaikilla kuorma-autoilla

2,2 kWh/km, tarvittava kokonaislatauskapasiteetti maakuntakuvaajan perusteella olisi 2609 GWh eli noin 2,61 TWh

Tarkastellaan seuraavaksi, mikä olisi tarvittava latauskapasiteetti valtateillä ja maakunnissa jos kuorma-autojen tehonkulutus olisi 1,4 kWh/km eli noin 20 % pienempi kuin 1,8 kWh/km.



Kuva 22: Tarvittava latauskapasiteetti valtateillä, kun kuorma-autojen energiankulutus on 1,4 kWh/km



Kuva 23: Tarvittava latauskapasiteetti maakunnittain, kun kuorma-autojen energiankulutus on 1,4 kWh/km

Yllä olevista kuvien 22 ja 23 kuvaajista nähdään tarvittava kapasiteetti valtatie- ja maakunta-kohtaisesti, jos kuorma-auton energiankulutus olisi keskimäärin 20 % pienempi referenssiin verrattuna eli energiankulutus olisi 1,4 kWh/km. Kuvaajien perusteella voidaan todeta, että valtatielle 3 tarvittaisiin eniten latauskapasiteettia eli noin 305 GWh vuodessa. Maakunta-kohtaisesti eniten latauskapasiteettia tarvittaisiin taas Kanta-Hämeessä, 172 GWh vuodessa. Jos energiankulutus olisi kaikilla kuorma-autoilla 1,4 kWh/km, tarvittava kokonaislatauskapasiteetti Suomessa olisi maakuntakuvaajan perusteella 1659 GWh eli noin 1,66 TWh vuodessa.

Jos tarkastellaan Kanta-Hämeen latauskapasiteetteja on 1,8 kWh/km kulutuksella 221 GWh. Herkkyysanalyysin avulla saadaan Kanta-Hämeen kapasiteetin ylärajaksi 270 GWh ja alarajaksi 172 GWh. Kapasiteetin tarve voi olla jotain tältä väliltä. Tämä tietysti riippuu siitä, mitä kuorma-autoja suomessa käytetään ja miten niiden energiankulutus, akun koko ja kantama eroaa Volvon FH Electric kuorma-autosta.

Taulukko 6: Maakuntien latauskapasiteettien perusteella laskettu koko Suomen vaatima latauskapasiteetti ajoneuvon kulutuksen suhteen sekä sähköistämisasteilla 10 %, 50 % ja 100 %.

Ajoneuvon kulutus (kWh/km)	Aste 10 %	Aste 50 %	Aste 100 %
1,4	166 GWh	830 GWh	1,66 TWh
1,8	213,4 GWh	1,067 TWh	2.134 TWh
2,2	261 GWh	1,305 TWh	2,609 TWh

Herkkyysanalyysin perusteella voidaan uskoa, että täyssähköisen kuorma-autoliikenteen vaatima latauskapasiteetti koko Suomen mittakaavassa on noin 1,6–2,6 TWh, kun tarkastellaan puoli- ja täysperävaunullisia kuorma-autoja sekä HCT-kuorma-autoja. Kulutus riippuu kuorma-automallien välisistä eroista kulutuksessa sekä sääolosuhteiden aiheuttamat vaihtelet kulutuksessa. Herkkyysanalyysissä täytyy huomioida, että jokaista Suomen valtatieä ei ole käsitelty, joten todellisuudessa tarvittava latauskapasiteetti raskaalle tieliikenteelle voi olla suurempi.

6 Johtopäätökset

Ajoneuvon akun koon suurentaminen vähentää ajoneuvolla kuljetettavan hyötykuorman määrää. Toisin sanoen voidaan olettaa, että hyötykuorman vähentyessä tarvitaan lisää ajoneuvoja kuljettamaan sama kuorma kuin aikaisemmin. Akkuteknologiaa kehittämällä tulevaisuudessa tullaan pääsemään pienempiin akun kokoihin ilman että akun kapasiteetti kärsii. Teollisuuden määrän kasvaessa vaaditaan myös raskaalta liikenteeltä enemmän kapasiteettiä ajoneuvojen määrässä sekä toimintasäteen muodossa. Sähköisen voimalinjan hyötysuhteen ja ilmastokysymysten huomiointi johtaa ennen pitkää raskaan liikenteen ja muun logistiikan sähköistämiseen, eri asia on sitten millainen energianlähde näitä sähkökäyttöjä pyörittää.

Kandidaatintyön perusteella voidaan arvioida, että Suomessa tarvittava latauskapasiteetti kuorma-autoliikenteelle 100 % sähköistämistasteella on noin 1,6–2,6 TWh vuodessa. Tämä on laskettu vuoden 2022 kuorma-autojen kokonaisliikennesuoritteen perusteella. Tutkimuksessa ei ole huomioitu jokaista valtatieta sekä raskaan tieliikenteen osalta vain kuorma-autoliikenne. Latauskapasiteetti on arvioitu laskemalla, jos kuorma-auton kulutus olisi 1,4 kWh/km, 1,8 kWh/km ja 2,2 kWh/km. Sähköistämistasteella 10 %, tarvittava latauskapasiteetti olisi noin 166 GWh–261 GWh. Sähköistämistasteella 50 %, tarvittava latauskapasiteetti olisi noin 830 GWh–1,3 TWh. Tulokset ovat suuntaa antavia.

Nykyisellään ei ole vielä riittävästi latausasemia, jotta raskaasta sähköisestä liikenteestä saataisiin täysi potentiaali irti. Akunvaihtoasemia tai latauspisteitä voisi integroida nykyisiin huoltoasemiin, joten uusia huoltoasemia ei tarvitse rakentaa. 1 MW:n suurteholatauksella kapasiteetiltään esimerkiksi 550 kWh ajoakun lataaminen 80 prosentin lataustilaan voi kestää 30 minuuttia ja täyteen 100 % noin 35 minuuttia. Siihen verraten akunvaihtoprosessi yhdelle akulle voisi kestää vain 3–4 minuuttia ollen jopa 10 kertaa nopeampaa. Kuorma-auton lavarakenteen alla on usein paljon tilaa ajoakustolle, jos akseleita ei ole suurta määrää. Yhden ajoakun ei tarvitsisi kestää kuin pari tuntia, jonka jälkeen kuorma-auto voi alkaa hyödyntämään toista akkua, koska lakisääteiset tauot on pidettävä 4,5 tunnin ajon jälkeen. Toisaalta, jos raskaan ajoneuvon latauksen ajoittaa lepoajalle, kuten järkevintä olisikin, ei pitkä latausaika tuottaisi ongelmia.

Kahden kaupungin välisessä liikenteessä riittää suurteholatausteknologia, sillä maantieteelliset etäisyydet ovat lyhyempiä, kuin mitä maakuntien välisessä raskaassa liikenteessä. Tällöin paluu tukikohtaan -menetelmää voidaan hyödyntää. Toisaalta esimerkiksi kahden kaupungin välisessä jakeluliikenteessä voidaan hyödyntää myös akunvaihtoteknologiaa, sillä akkujen kapasiteetin ei tarvitse olla kovinkaan suuri, sillä ajomatkat ovat lyhyempiä. Voisiko näitä kahta teknologiaa yhdistää yhdessä ratkaisussa, jolloin kuljettaja saa itse päättää kyseisessä tilanteessa, että lataako ajoneuvon vai vaihtaako ajoakun.

Sähköistettyjen kuorma-autojen toimintasäteen yhdellä latauksella ei tarvitsisi olla paljoakaan 350 kilometriä pidempi, sillä kuorma-autonkuljettajien lepoajat määrittävät yhden yhtäjaksoisen ajoperiodin olevan maksimissaan 4,5 tuntia. Tämän jälkeen täytyy pitää vähintään 45 minuutin lepotauko, jolloin kuorma-auton kerkeää ladata helposti suurteholatauksella. Säännölliset lepoajat pohjautuvat EU:n asetukseen 561/2006. Näin toimitaan jo esimerkiksi Ruotsissa, jossa täyssähköisellä Volvo FH 74 000 kg:n HCT-kuorma-autolla ajetaan jopa 12 tuntia päivässä 70 kilometrin väliä. Lataus suoritetaan tauoilla 180 kW:n suurteholatureilla. (Volvo, 2023b) Kyseessä on kahden perävaunun yhdistelmä ja kuormaa voidaan kuljettaa yhtä paljon kuin diesel-käyttöisellä kuorma-autolla.

Tällä hetkellä täyssähköisten kuorma-autojen määrä Suomessa Autoalan tiedoituskeskuksen mukaan on 65 kappaletta. Tulevaisuudessa, jossa liikenteen suunnitellaan olevan täysin hiili-neutraali, on 866 suurteholatauspistettä aivan liian vähän. Kuorma-autojen ja latauspisteiden hyvä suhdeluku olisi noin 10 kuorma-autoa suurteholatauspistettä kohden. EU:n esityksen mukaan latausasemia tulisi olla noin 60 kilometrin välein ja tämän pohjalta voitaisiin pohdita lataus- tai akunvaihtoasemien sijoittelua maantieteellisesti. Latauspisteiden jakautuminen maantieteellisesti on vielä toistaiseksi heikolla tasolla. Suurin osa latausinfrastruktuurista on sijoittunut Helsinki–Turku–Tampere –akselille, mikä on loogista ajatellen, että tällä alueella on suurimmat teollisuuskeskittymät, lentokentät ja satamat.

Raskaan liikenteen sähköistäminen asteittain saattaa olla ainoa järkevä ratkaisu, jotta sähköverkon alueellinen ylikuormittuminen ei koidu ongelmaksi. Ennen kuin Suomen valtateillä liikkuu suuri määrä sähköistä raskasta liikennettä, on suurteholatausverkosto saatava valmiiksi ja luotettavaksi, jotta lataamisen hinta ei vaihtelee suunnattomasti eikä sähköverkko kärsi ajoittaisesta suuresta tehohäviöstä, joka kuluu sähköisten ajoneuvojen lataukseen. Raskaiden ajoneuvojen ajoakkujen suuremmat kapasiteetit vaativat suurempaa lataustehoa, jotta päästään nopeisiin latausaikoihin ja halvempiin lataushintoihin. ICCT, 2023 ennusteiden mukaan sähköön hyödyntäminen kuorma-autojen energianlähteenä tulee lähitulevaisuudessa olemaan edullisin vaihtoehto verrattuna muihin tällä hetkellä käytössä oleviin energianlähteisiin ja polttoaineisiin. Ennusteen mukaan vuonna 2030 akkusähkökuorma-auton kustannukset per kilometri on jopa 18,3 %:a edullisemmat kuin diesel-käyttöisten kuorma-autojen kustannukset. Näihin kustannuksiin on laskettu kunnossapito, vakuutukset, jälleenmyyntihinta, polttoaine- tai latauskustannukset, tietullit ja -maksut sekä muut käyttäjäkustannukset.

Merkittävä sähköisen raskaan liikenteen yleistymistä hidastava tekijä on yksinkertaisesti latausinfrastruktuurin eli latausverkoston puuttuminen raskaille ajoneuvoille. Henkilöautoille on paljon alle 50 kW:n latauspisteitä, mutta raskaan kaluston vaatima suuremman teholuokan latausinfrastruktuuri on puutteellista. (Liikenne ja viestintäministeriö, 2023) Latausverkostoa ei ole vielä riittävässä määrin ja tasaisesti ympäri Suomea, jotta kuljetusyhtiöiden olisi kannattavaa hankkia täyssähköisiä kuorma-autoja pitkiin kuljetuksiin.

Latausinfrastruktuuriin investoidaan suuria määriä rahaa ja vuoteen 2030 mennessä Suomessa tulee olemaan vähintään 50–60 uutta latausasemaa ja monta sataa latauspistettä raskaalle liikenteelle. Tämä on linjassa ICCT, 2023 raportin kanssa, joka ennustaa sähkön olevan edullisin energianlähde kuorma-autoille vuonna 2030. Liikenne- ja viestintäministeriö on raportissaan arvioinut, että sähkö- ja kaasukuorma-autojen kappalemäärätavoitteisiin pääseminen vaatisi noin kymmenen miljoonan euron vuosittaiset tuet vuoteen 2030 asti.

Euroopan komission asettamien tavoitteiden mukaan vuoteen 2030 raskaan tieliikenteen hiilidioksidipäästöjen on oltava vähentynyt 45 % ja vuoteen 2040 jopa 90 % verrattuna vuoden 2019 päästöjen tasoon. (EC, 2023) Tämä pakottaa kuljetusyhtiöitä sähköistämään raskasta tieliikennettään yhtiöiden tahdosta riippumatta.

Liikenne- ja viestintäministeriö (Liikenne ja viestintäministeriö, 2023) esittää raportissaan, että vuoden 2030 tavoitteena on, että noin 5 % kuorma-autokannasta olisi sähköisiä. Se voisi olla realistinen tavoite, sillä täyssähköisten kuorma-autojen määrä on kovassa kasvussa, latausinfrastruktuurin määrä voisi olla silloin sopivaa ja täyssähköisten kuorma-autojen kustannukset tarpeeksi matalat. Myös kuorma-autojen valmistajien, esimerkiksi Volvo Trucks:n tavoitteena on, että puolet sen maailmanlaajuisesta kuorma-autojen kokonaismyynnistä tulee olemaan sähköisiä vuoteen 2030 mennessä (Volvo, 2023b).

Lihua Liu & Danilovic, 2022 analyysin ja tämän kandidaatintyön perusteella voidaan uskoa, että nämä kaksi kyseistä latausratkaisua eli akunvaihtoteknologia ja suurteholatausteknologia täydentävät toisiaan. On olemassa skenaarioita, joissa akunvaihtoteknologia on tehokkaampaa, kuten esimerkiksi raskaille ajoneuvoille, joiden on toimittava jatkuvasti, sekä operaatiot, joissa pidemmät latauspysähdykset eivät ole mahdollisia. Samaan aikaan on perusteltua uskoa, että on skenaarioita, joissa suurteholataus on tehokkaampaa, kuten kaupunkien välinen liikenne ja tiheään asutut alueet, joille on vaikea perustaa akunvaihtopisteitä tai skenaario, jossa paluu tukikohtaan -menetelmää voidaan hyödyntää. Mahdollinen ratkaisu voisi olla, että ajoneuvon akun voi ladata sekä vaihtaa tilanteesta riippuen.

Lähdeluettelo

- ACEA (2021). Interactive map – Truck charging points needed in Europe by 2025 and 2030, per country. URL: <https://www.acea.auto/figure/interactive-map-truck-charging-points-needed-in-europe-by-2025-and-2030-per-country/>.
- Autoalan tiedotuskeskus (2023). Liikenteen hiilidioksidipäästöjen kehitys. URL: https://www.aut.fi/ymparisto/tieliikenteen_ilmastovaikutukset/liikenteen_paastokehitys.
- Ding, R., Liu, Z., Li, X., Hou, Y., Sun, W., Zhai, H. & Wei, X. (2022). Joint charging scheduling of electric vehicles with battery to grid technology in battery swapping station. *Energy Reports*, s. 872–882.
- E-mobility (2023). Sähköisen liikenteen tilannekatsaus Q3/2023. URL: <https://emobility.teknologiateollisuus.fi/sites/emobility/files/inline-files/2023%20Q3%20Sa%CC%88hko%CC%88inenLiikenne%20tilannekatsaus%202023%2011%2003%20jaettava.pdf>.
- EC (2023). Reducing CO emissions from heavy-duty vehicles. URL: https://climate.ec.europa.eu/eu-action/transport/road-transport-reducing-co2-emissions-vehicles/reducing-co2-emissions-heavy-duty-vehicles_en.
- Fintraffic (2023a). LAM-dokumentaatio. URL: <https://www.digitraffic.fi/tieliikenne/lam/>.
- Fintraffic (2023b). LAM-tilastohaku. URL: <https://tie.digitraffic.fi/ui/tms/history/>.
- Gonzalez-Salazar, M., Kormazos, G. & Jienwatcharamongkhon, V. (2023). Assessing the economic and environmental impacts of battery leasing and selling models for electric vehicle fleets: A study on customer and company implications. *Journal of Cleaner Production* 422, s. 138356.
- Halvorson, B. (2021). First US charging station for electric semis is ready for megawatt fast charging.
- Al-Hanahi, B., Ahmad, I., Habibi, D. & Masoum, M. A. (2021). Charging infrastructure for commercial electric vehicles: Challenges and future works. *IEEE Access* 9, s. 121476–121492.
- Hongyang Cui, Y. X. & Niu, T. (2023). CHINA IS PROPELLING ITS ELECTRIC TRUCK MARKET BY EMBRACING BATTERY SWAPPING. URL: <https://theicct.org/china-is-propelling-its-electric-truck-market-aug23/>.
- ICCT (2021). Battery-electric tractor-trailers in the European Union: A vehicle technology analysis. URL: <https://theicct.org/wp-content/uploads/2021/12/eu-tractor-trailers-analysis-aug21-2.pdf>.
- ICCT (2023). A TOTAL COST OF OWNERSHIP COMPARISON OF TRUCK DECARBONIZATION PATHWAYS IN EUROPE. URL: <https://theicct.org/publication/total-cost-ownership-trucks-europe-nov23/>.

- Isomäki, R. (2021). Sähköautot yleistyvät vauhdilla, mutta litiumakkuja varjostaa lapsityövoima ja ympäristötuhot. URL: <https://yle.fi/aihe/artikkeli/2021/05/19/sahkoautot-yleistyvat-vauhdilla-mutta-litiumakkuja-varjostaa-lapsityovoima-ja>.
- Jahangir Samet, M., Liimatainen, H., Vliet, O. P. R. van & Pöllänen, M. (2021). Road freight transport electrification potential by using battery electric trucks in Finland and Switzerland. *Energies* 14(4), s. 823.
- Kauppalehti (2023). Liki 200 miljoonan hanke täysi susi – Saksa purkaa sähkörekkojen virtajohtoviritykset. URL: <https://www.kauppalehti.fi/uutiset/liki-200-miljoonan-hanke-taysi-susi-saksa-purkaa-sahkorekkojen-virtajohtoviritykset/f14ae589-ed0e-45a6-8100-98a1070765c7>.
- Kim, J., Song, I. & Choi, W. (2015). An electric bus with a battery exchange system. *Energies* 8(7), s. 6806–6819.
- Lihua Liu, J. & Danilovic, M. (2022). Experiences of Battery swapping for Electric Heavy Trucks from China.
- Liikenne ja viestintäministeriö (2023). Ohjelma tieliikenteen uusien polttoaineiden jakeluinfraan kehittämiseksi Suomessa vuoteen 2035. URL: https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/164799/LVM_2023_4.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
- Liimatainen, H., Pöllänen, M. & Nykänen, L. (2020). Impacts of increasing maximum truck weight—case Finland. *European Transport Research Review* 12, s. 1–12.
- Lähdetluoma, M. (2022). Raskaan liikenteen sähköistyminen on alkanut – sähkökuorma-auton ohjaamossa voi lähes kuulla linnun laulun. URL: <https://yle.fi/a/3-12480266>.
- NordPool (2024). NordPool day-ahead prices. URL: <https://data.nordpoolgroup.com/auction/day-ahead/prices?deliveryDate=2024-02-08&deliveryAreas=AT,FI,SYS¤cy=EUR&aggregation=Daily>.
- Oikkonen, O. (2022). *Raskaanliikenteen sähköistyminen ja sen vaikutukset sähkönjakeluverkkoon*.
- Paukkeri, M. (2022). EU:n esitys: Sähköauton latausaseman pitäisi vuosikymmenen loppuun mennessä löytyä 60 kilometrin etäisyydeltä isosta osasta Suomea. URL: <https://yle.fi/a/3-12478130>.
- Preger, Y., Barkholtz, H. M., Fresquez, A., Campbell, D. L., Juba, B. W., Romàn-Kustas, J., Ferreira, S. R. & Chalamala, B. (2020). Degradation of commercial lithium-ion cells as a function of chemistry and cycling conditions. *Journal of The Electrochemical Society* 167(12), s. 120532.
- Pulse.fi (2023). DB Schenker ottaa käyttöön Suomen ensimmäisen täyssähköisen HCT-yhdistelmän. URL: <https://pulse.dbschenker.com/fi/db-schenker-tayssahkoinen-hct-yhdistelma/>.
- Revankar, S. R. & Kalkhambkar, V. N. (2021). Grid integration of battery swapping station: A review. *Journal of Energy Storage* 41, s. 102937.

- Sauter, V., Speth, D., Plötz, P. & Signer, T. (2021). *A charging infrastructure network for battery electric trucks in Europe*. Tekninen raportti. Working Paper Sustainability ja Innovation.
- Shaker, M. H., Farzin, H. & Mashhour, E. (2023). Joint planning of electric vehicle battery swapping stations and distribution grid with centralized charging. *Journal of Energy Storage* 58, s. 106455.
- SPEK (2021). LATAA TURVALLISESTI JA VÄLTÄ AKKUPALOT – NIITÄ ON LÄHES MAHDOTON SAMMUTTAA. *SPEK*. URL: <https://www.spek.fi/lataa-turvallisesti-ja-valta-akkupalot-niita-on-lahes-mahdoton-sammuttaa/>.
- Steinstraeter, M., Heinrich, T. & Lienkamp, M. (2021). Effect of low temperature on electric vehicle range. *World Electric Vehicle Journal* 12(3), s. 115.
- Tilastokeskus (2023a). Kotimaan kuorma-autoliikenteen suoritteet kokonaispainoluokan mukaan, 2011-2022. URL: https://pxdata.stat.fi/PXWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin__kttav/?tablelist=true.
- Tol, D., Frateur, T., Verbeek, M., Riemersma, I. & Mulder, H. (2022). *Techno-economic uptake potential of zero-emission trucks in Europe*.
- Traficom (2023). Liikenne ja liikenne-ennuste maanteillä. URL: <https://tieto.traficom.fi/fi/tilastot/liikenne-ja-liikenne-ennuste-maanteilla>.
- Ukkonen, E. (2022). *Sähköautojen julkinen lataus ja toimintamalli latauksen kilpailutuksen järjestämiseksi kantakaupunkialueella*.
- Volvo (2019). kokonaisuusmassat ja -mitat vetoautojen ja yhdistelmien suurimmat massat ja mitat Suomessa 21.1.2019 alkaen. URL: https://www.volvotrucks.fi/content/dam/volvotrucks/markets/finland/trucks/VETOAUTO_juliste_2019.pdf.
- Volvo (2023a). Volvo FH:n erittelyt. URL: <https://www.volvotrucks.fi/fi-fi/trucks/models/volvo-fh/specifications.html>.
- Volvo (2023b). Volvo toimittaa 74 tonnin sähkökuorma-auton. URL: <https://www.volvotrucks.fi/fi-fi/news/press-releases/2023/jun/volvo-delivers-74-tonne-electric-truck.html>.
- Volvo (2024). Volvo Trucks -moottorit. URL: <https://www.volvotrucks.fi/fi-fi/trucks/features/volvo-trucks-engine-range.html>.
- Zhang, T.-y., Yao, E.-j., Yang, Y., Pan, L., Li, C.-p., Li, B. & Zhao, F. (2023). Deployment optimization of battery swapping stations accounting for taxis' dynamic energy demand. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 116, s. 103617.
- Zhang, Y., Huo, Q.-y., Du, P.-p., Wang, L.-z., Zhang, A.-q., Song, Y.-h., Lv, Y. & Li, G.-y. (2012). Advances in new cathode material LiFePO₄ for lithium-ion batteries. *Synthetic Metals* 162(13-14), s. 1315–1326.