



Raskaan liikenteen sähköistyminen

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Sähkötekniikan kandidaatintyö

2024

Kasimir Ahonen

Tarkastaja: Apulaisprofessori Lassi Aarniovuori

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUT Energiajärjestelmät

Sähkötekniikka

Kasimir Ahonen

Raskaan liikenteen sähköistyminen

Kandidaatintyö

2024

46 sivua, 10 kuvaa ja 9 taulukkoa

Tarkastaja: Apulaisprofessori Lassi Aarniovuori

Avainsanat: raskas liikenne, liikenteen sähköistyminen, sähköisen liikenteen teknologiat

Tässä kandidaatintyössä tutkitaan raskaan liikenteen sähköistymisen tilannetta Euroopassa sekä muualla maailmassa. Raskaan liikenteen sähköistyminen on vielä hyvin varhaisessa vaiheessa, mutta järkevillä teknologian ratkaisuilla voidaan siitä tehdä kannattava vihreä vaihtoehto verrattuna perinteiseen polttomoottoriin.

Työ on kirjallisuuskatsaus, joka perustuu avoimesti saatavilla olevaan materiaaliin. Se on jaettu johdantoon, päälukuun, pohdintoihin ja yhteenvetoon. Osana johdantoa tutkitaan millaisilla direktiiveillä ja tukipaketeilla raskaan liikenteen sähköistymistä pyritään kiihdyttämään. Pääluvussa käydään läpi erilaisia teknologioita, joilla edistetään raskaan liikenteen sähköistymistä. Luvussa vertaillaan muun muassa vety- ja akkuteknologiaa ja tuodaan esille haasteita kuten latausinfrastruktuurin ja sähköverkon kapasiteetin riittävyys. Työssä on hyödynnetty runsaasti kuvia ja taulukoita havainnollistamaan dataa.

Työn lopussa vertaillaan tämänhetkisen raskaan liikenteen kaluston suorituskykyä, tuodaan esille omia pohdintoja sekä tehdään yhteenveto työstä. Kaluston vertailussa vertaillaan akku- ja vetyteknologiaa perinteiseen polttomoottoriin.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT
LUT School of Energy Systems
Electrical Engineering

Kasimir Ahonen

Electrification of heavy-duty traffic

Bachelor's thesis

2024

46 pages, 10 figures and 9 tables

Examiner: Associate professor Lassi Aarniovuori

Keywords: heavy-duty traffic, electrification of traffic, electric transportation technologies

In this bachelor's thesis, the situation of the electric heavy-duty traffic in Europe and other parts of the world is studied. The electrification of the heavy-duty traffic is still at a very early stage, but with sensible technological solutions it can be made a profitable green alternative compared to the traditional combustion engine.

The work is a literature review based on openly available material. It is divided into introduction, main chapter, reflections, and summary. As part of the introduction, it is examined what kind of directives and support packages are used to accelerate the electrification of heavy-duty traffic. The main chapter reviews various technologies that promote the electrification of the heavy-duty traffic. The chapter compares for example, hydrogen and battery technology and highlights challenges such as the adequacy of charging infrastructure and power grid capacity. The work uses plenty of pictures and tables to illustrate the data.

At the end of the work, the performance of the current heavy duty truck fleet is compared, own considerations are brought forward, and a summary of the work is made. The comparison of the truck fleet is made between the battery- and hydrogen technology and the traditional internal combustion engine.

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Symboliluettelo

<i>E</i>	tehotiheys	[W/kg]
<i>I</i>	virta	[A, kA]
<i>P</i>	teho	[W, kW]
<i>T</i>	lämpötila	[°C, K]
<i>U</i>	jännite	[V, kV]

Lyhenteet

AC	Vaihtovirta (Alternating Current)
AFIR	Asetus vaihtoehtoisten polttoaineiden infrastruktuurin käyttöönotosta (Alternative Fuel Infrastructure Regulation)
BET	Akkukäyttöinen sähkörekka (Battery Electric Truck)
CCS	Yhdistetty latausjärjestelmä (Combined Charging System)
CO ₂	Hiilidioksidi (Carbon dioxide)
DC	Tasavirta (Direct Current)
EU	Euroopan unioni (European Union)
EV	Sähköajoneuvo (Electric Vehicle)
EV100	Sähköajoneuvojen käyttöönoton edistämistä varten tehty kansainvälinen aloite
GCWR	Ajoneuvon ja sen vetämän yhdistelmän enimmäismassa (Gross Combined Weight Rating)
GVWR	Ajoneuvon enimmäismassa (Gross Vehicle Weight Rating)

HDV	Raskas ajoneuvo (Heavy-Duty Vehicle)
HFCV	Vetypolttokennoajoneuvo (Hydrogen Fuel Cell Vehicle)
IEA	Kansainvälinen energiajärjestö (International Energy Agency)
IPM	Kestomagneettitahtimoottori upotetuilla magneeteilla (Internal Permanent Magnet)
MCS	Megawattiluokan latausjärjestelmä (Megawatt Charging System)
PEMFC	Polttokennon protoninvaihtokalvo (Proton-Exchange Membrane Fuel Cell)
PMSM	Kestomagneettimoottori (Permanent Magnet Synchronous Motor)
SiC	Piikarbidi (Silicon carbide)
SPM	Pintamagneetikone (Surface Permanent Magnet Motor)
TCO	Kokonaisomistuskustannukset (Total Cost of Ownership)
V2G	Ajoneuvon akun sähkötehon hyödyntäminen sähköverkossa (Vehicle-to-Grid)
V2X	Ajoneuvon akun sähkötehon hyödyntäminen missä tahansa kohteessa (Vehicle-to-Everything)

Sisällysluettelo

Tiivistelmä	ii
Abstract	iii
Symboli- ja lyhenneluettelo	iv
1 Johdanto	2
1.1 Päästöstandardit ja sähköistymisen tilanne	4
1.2 Tukipolitiikka ja kannustimet Euroopassa	9
2 Teknologian haasteet ja kehitys	13
2.1 Akkuteknologia ja siihen liittyvät haasteet	13
2.1.1 Akkukäyttöinen sähkörekka.....	15
2.1.2 Vetypolttomoottori ja -kenno.....	17
2.2 Sähköverkon kapasiteetin tarve.....	19
2.2.1 Vehicle-to-Grid	22
2.3 Latausmenetelmät ja latausinfrastruktuuri Euroopassa.....	23
2.3.1 MCS-lataus.....	26
2.3.2 Akunvaihto.....	27
2.4 Sähkömoottorit	28
2.5 Tämänhetkisen kaluston vertailu.....	30
3 Pohdinnat	31
4 Yhteenveto	33
Lähteet	36

1 Johdanto

Tässä kandidaatintyössä tutkitaan raskaan liikenteen sähköistymisen mahdollisuuksia Euroopassa sekä muualla maailmassa. Työssä käydään läpi raskaan liikenteen sähköistymiseen liittyvät direktiivit ja tukipolitiikka, sekä eri teknologioita ja niihin liittyviä haasteita.

Raskaan liikenteen sähköistyminen tuo mukanaan uusia haasteita. Ajoneuvot vaativat käytettävän ja suuren energiantarpeen takia entistä tehokkaampia ja isompia akkuja sekä nopeampia latausmenetelmiä. Teknologiaa kehitetään jatkuvasti, jotta sähköajoneuvoista tulisi kilpailukykyisempiä verrattuna perinteisillä polttomoottoreilla toimiviin ajoneuvoihin. Eri-laisilla kannustimilla ja pakotteilla pyritään kiihdyttämään raskaan liikenteen sähköistymistä ja siirtymää kohti hiilineutraalia tulevaisuutta.

Työ on kirjallisuuskatsaus, joka koostuu johdannosta, pääluvusta, pohdinnoista sekä johtopäätöksistä. Johdanto sisältää tilannekatsauksen tämänhetkisestä sähköistymisen tilasta, päästöstandardeista ja tukipolitiikasta. Tavoitteena on käydä laajasti läpi raskaan liikenteen sähköistymisen tilanne monella eri osa-alueella.

Raskaat ajoneuvot jaetaan usein luokkiin niiden kokonaispainon ja akseli tyypin perusteella. Euroopan ja Yhdysvaltojen raskaiden ajoneuvojen painoluokat on listattuna taulukoihin 1.1 ja 1.2.

Euroopan unionissa mailla on usein omat maakohtaiset ajoneuvoluokat raskaille ajoneuvoille. Päästöstandardien luonnin yhteydessä ajoneuvot ovat kuitenkin luokiteltu omiin luokkiin, jotka koskevat kaikkia Euroopan Unionin maita. Raskaat ajoneuvot on jaettu 17 eri luokkaan riippuen niiden painosta ja akseli tyypistä. Lisäksi ne on myös jaettu rekkavetureihin ja kiinteisiin kuorma-autoihin. Rekkavetureihin on mahdollista kiinnittää puolipe-rävaunu.

Yhdysvalloissa raskaat ajoneuvot on luokiteltu kokonaispainon perusteella kahdeksaan eri ryhmään. Luokat 3–8 ovat rinnastettavissa Euroopan unionin asettamiin raskaiden ajoneuvojen painoluokkiin.

Taulukko 1.1. Euroopan raskaiden ajoneuvojen painoluokat ja akseli tyypit CO₂-päästöjen sertifiointiin (TransportPolicy, 2019).

Luokka	Akseli tyyppi	Paino
0 (Kiinteä)	4x2	>3,5-<7,5 tonnia
1 (Kiinteä)/(Rekkaveturi)		7,5–10 tonnia
2 (Kiinteä)/(Rekkaveturi)		>10–12 tonnia
3 (Kiinteä)/(Rekkaveturi)		>12–16 tonnia
4 (Kiinteä)		>16 tonnia
5 (Rekkaveturi)		>16 tonnia
6 (Kiinteä)	4x4	>7,5–16 tonnia
7 (Kiinteä)		>16 tonnia
8 (Rekkaveturi)		>16 tonnia
9 (Kiinteä)	6x2	Kaikki painot
10 (Rekkaveturi)		Kaikki painot
11 (Kiinteä)	6x4	Kaikki painot
12 (Rekkaveturi)		Kaikki painot
13 (Kiinteä)	6x6	Kaikki painot
14 (Rekkaveturi)		Kaikki painot
15 (Kiinteä)	8x2	Kaikki painot
16 (Kiinteä)	8x4	Kaikki painot
17 (Kiinteä)	8x6/8	Kaikki painot

Taulukko 1.2. Yhdysvaltojen raskaiden ajoneuvojen painoluokat (U.S. Department of Energy, 2012).

Keskiraskas ajoneuvo	Luokka 3	4.536–6.35 tonnia
	Luokka 4	6,351–7,257 tonnia
	Luokka 5	7,258–8,845 tonnia
Raskas ajoneuvo	Luokka 6	8,846–11,793 tonnia
	Luokka 7	11,794–14,969 tonnia
	Luokka 8	>14,969 tonnia

1.1 Päästöstandardit ja sähköistymisen tilanne

Euroopan unionin (EU) päästöstandardeilla pyritään antamaan teollisuudelle selkeä signaali pyrkiä nollapäästäteknologioihin ja nopeuttaa latausinfrastruktuurin laajentumista. Standardien käyttöönotto vähentäisi EU:n energiariippuvuutta fossiilipolttoaineista ja parantaisi kaupunkien ilmanlaatua. Raskaan liikenteen siirtyminen nollapäästäteknologioihin edesauttaisi huomattavasti EU:n ilmastoneutraalius tavoitetta 2050. (Euroopan komissio, 2023.)

Vuonna 2019 julkaistiin kaikkien aikojen ensimmäiset EU:n laajuiset raskaiden ajoneuvojen CO₂-päästöstandardit. Tämä asetus pitää sisällään muun muassa päästövähennystavoitteet vuosille 2025 ja 2030 (Asetus 2019/1242/EU):

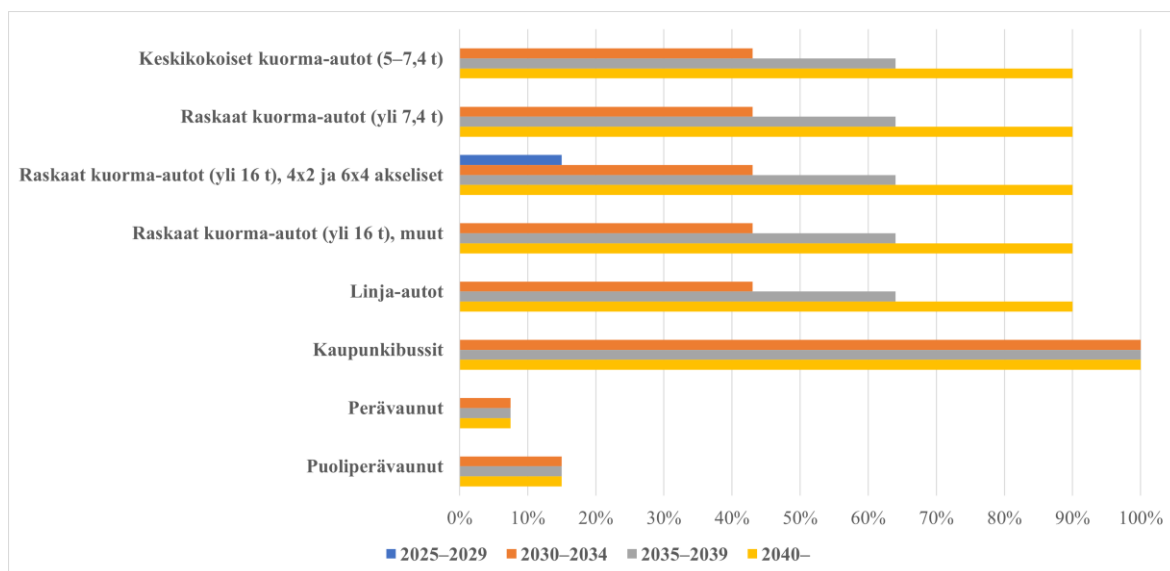
- 15 % päästövähennys vuodesta 2025 eteenpäin;
- 30 % päästövähennys vuodesta 2030 eteenpäin.

Euroopan komissio ehdottaa osana vihreän kehityksen ohjelmaa 2023, uudistaa vuoden 2019 raskaan liikenteen päästöstandardeja. Ehdotuksessa todetaan, että kuorma-autot, kaupunki – ja kaukoliikenteen bussit aiheuttavat Euroopassa yli 6 % kasvihuonepäästöistä ja yli 25 % tieliikenteen kasvihuonepäästöistä. Uusi asetus sisältäisi raskaan liikenteen päästövähennystavoitteita sekä ajoneuvoluokkakohtaisia päästövaatimuksia. Vuotuisia vähennyksiä on verrattu vuoden 2019 päästöihin (Euroopan komissio, 2023):

- 45 % päästövähennys vuodesta 2030 eteenpäin;
- 65 % päästövähennys vuodesta 2035 eteenpäin;
- 90 % päästövähennys vuodesta 2040 eteenpäin.

Euroopan komission ehdotuksen liitteissä on listattu ajoneuvokohtaisia päästövaatimuksia verrattuna vuoden 2019 arvoihin. Uudet päästörajat koskevat entistä suurempaa määrää ajoneuvoryhmiä. Uuteen ehdotukseen on lisätty muun muassa keskikokoiset kuorma-autot, linja-autot ja perävaunut. Kaupunkibussien odotetaan olevan päästöttömiä vuoteen

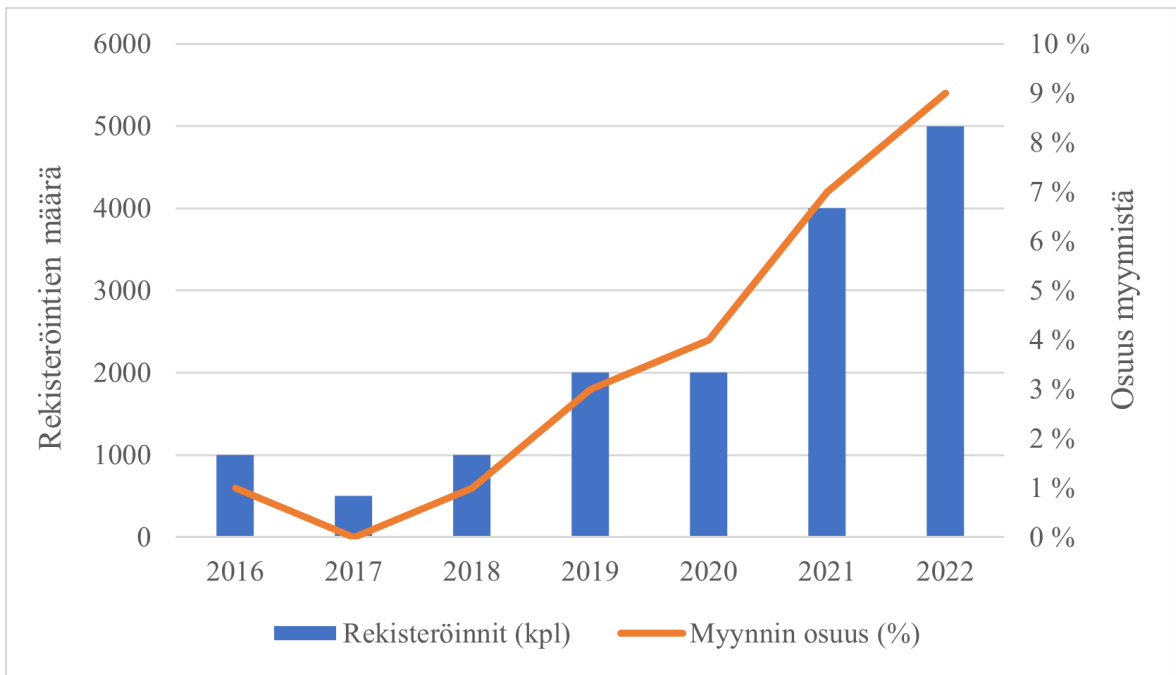
2030 mennessä. Ajoneuvoluokkakohtaiset päästövaatimukset on esitetty kuvassa 1.1. (Amending Regulation 2019/1242/EU.)



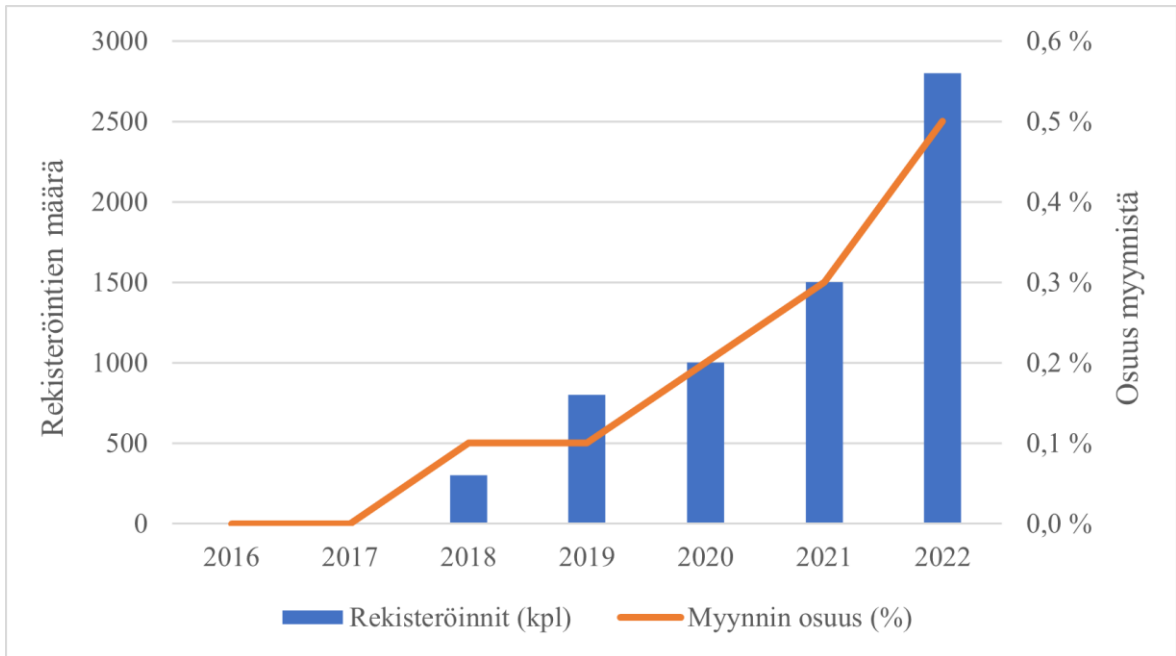
Kuva 1.1. Ajoneuvoluokkakohtaiset päästövaatimukset (Amending Regulation 2019/1242/EU).

Pariisin sopimuksen ilmastotavoitteet toimivat kansainvälisellä tasolla päästöstandardeina. Noin 45 % raskaiden ajoneuvojen myynnistä tulisi maailmanlaajuisesti olla nollapäästöisiä vuoteen 2030 mennessä, jotta päästöt olisivat Pariisin sopimuksen mukaisia. Myynnistä 100 % tulisi olla nollapäästöistä vuoteen 2040 mennessä. (ZEVTC, 2022.) Päästötavoitteet ovat siis hyvin samanlaiset kuin Euroopan komission ehdottamat uudet päästöstandardit.

Kansainvälinen energiajärjestö (IEA) on kerännyt dataa tämänhetkisestä raskaan liikenteen sähköistymisen tilanteesta. Analyysi perustuu maakohtaisiin ilmoituksiin ja EV100-tietoihin sekä ajoneuvovakuutuksen rekisteröintitietoihin. Data koostuu linja-autoista, keskikokoisista ajoneuvoista (3.5–15 t) ja raskaista ajoneuvoista (15 t ja yli). (IEA, 2023.):



Kuva 1.2. Sähköbussien rekisteröinnit ja myynnin osuus Euroopassa (IEA, 2023).

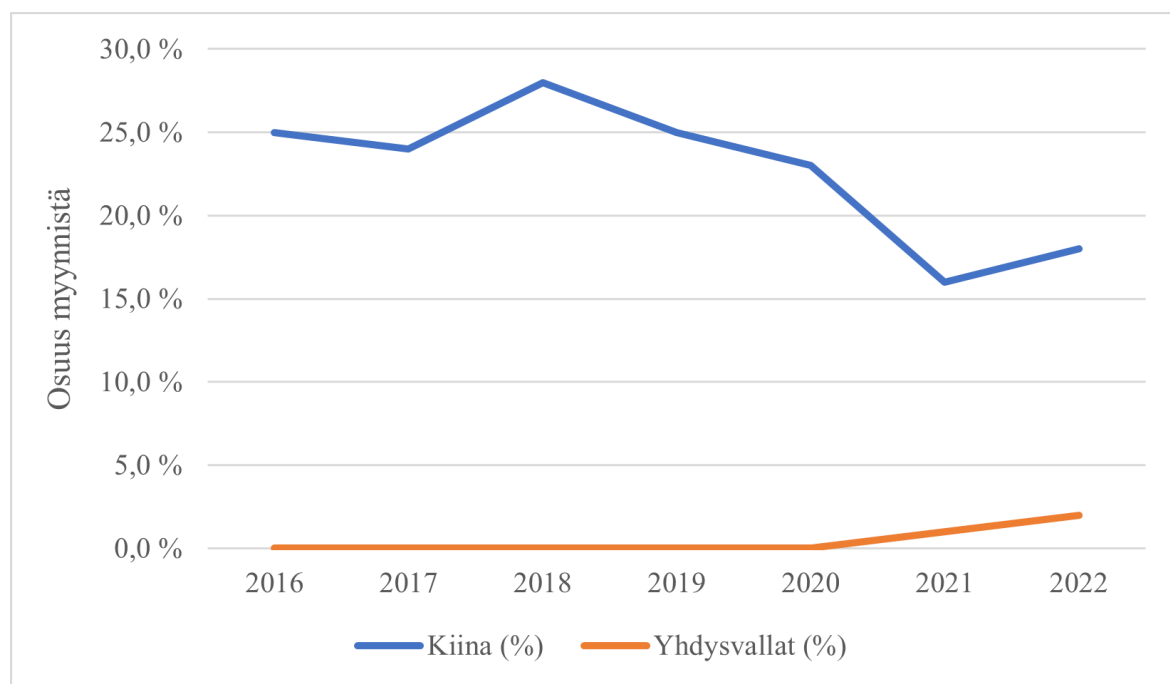


Kuva 1.3. Sähkörekkojen rekisteröinnit ja myynnin osuus Euroopassa (IEA, 2023).

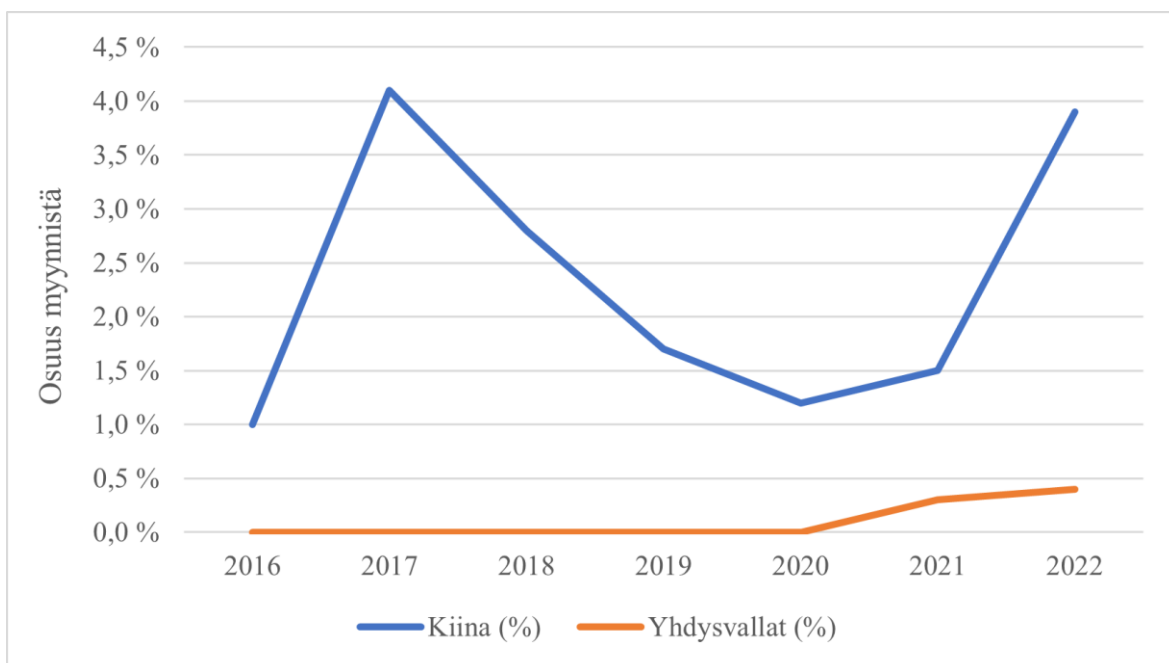
Tilastoista huomataan, että kehitys raskaan liikenteen sähköistymisessä Euroopassa on nousujohteista. Sähköbussit ovat sähköistyneet huomattavasti nopeammin kuin sähkörekat. Vuodesta 2018 eteenpäin myös sähkörekoja on otettu käyttöön teknologian ja tuotannon kehittyessä. Eurooppalaiset kuorma-autojen valmistajat ovat luvanneet 44 % myynnistä koostuvan nollapäästeteknologiasta vuoteen 2030 mennessä. Osa valmistajista pyrkii jopa 70 % nollapäästörekkojen myyntiosuuteen. (T&E, 2022.)

Sähköbussilla on erittäin paljon sähköistämisen potentiaalia, sillä matkojen pituus ja reitit pysyvät usein samoina. Busseja voidaan ladata kätevästi yön aikana varikoilla, eivätkä ne tästä syystä tarvitse tiheää latausinfrastruktuuria. Sähköbussit ovat osoittautuneet kustannustehokkaiksi verrattuna perinteisiin polttomoottoreilla toimiviin busseihin, kun otetaan huomioon tyypillinen käyttöikä (8–15 vuotta). (ICCT, 2022.)

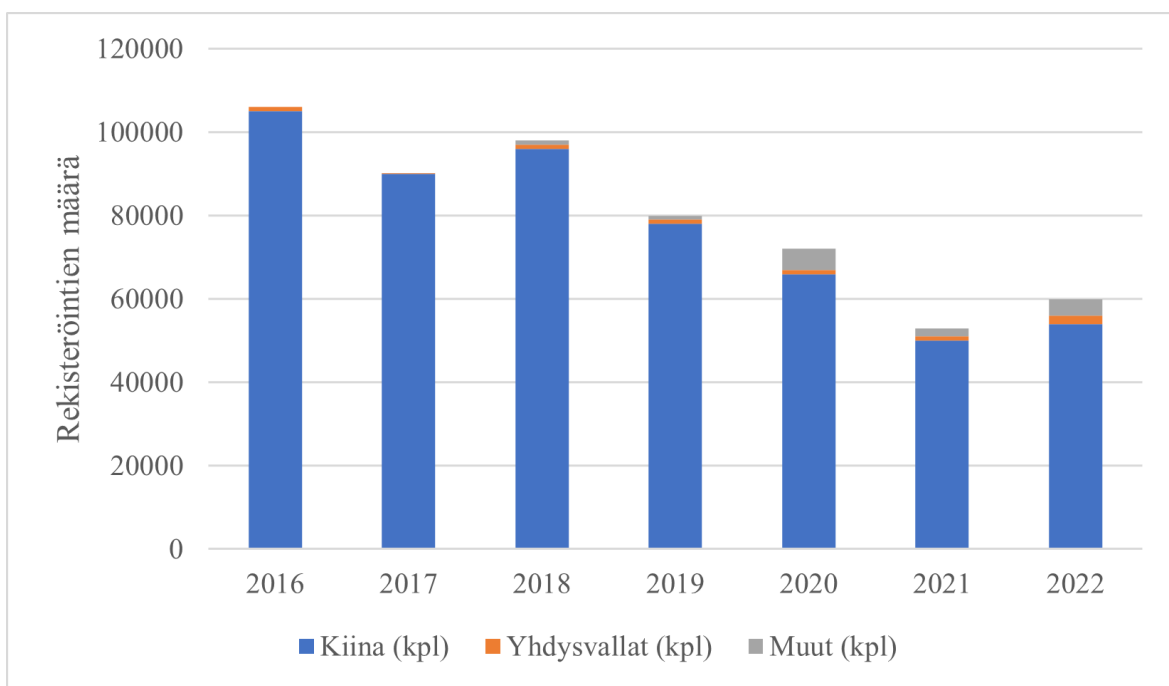
Raskas liikenne sähköistyy kasvavaan tahtiin myös kansainvälisellä tasolla. IEA on koonnut dataa sähköisten raskaiden ajoneuvojen rekisteröinnistä ja myynnin osuudesta kansainvälisellä tasolla. Osassa dataa on huomioitu pelkästään Kiinan ja Yhdysvaltojen osuus sillä raskaan liikenteen sähköistyminen muualla on vielä hyvin vähäistä. (IEA, 2023.):



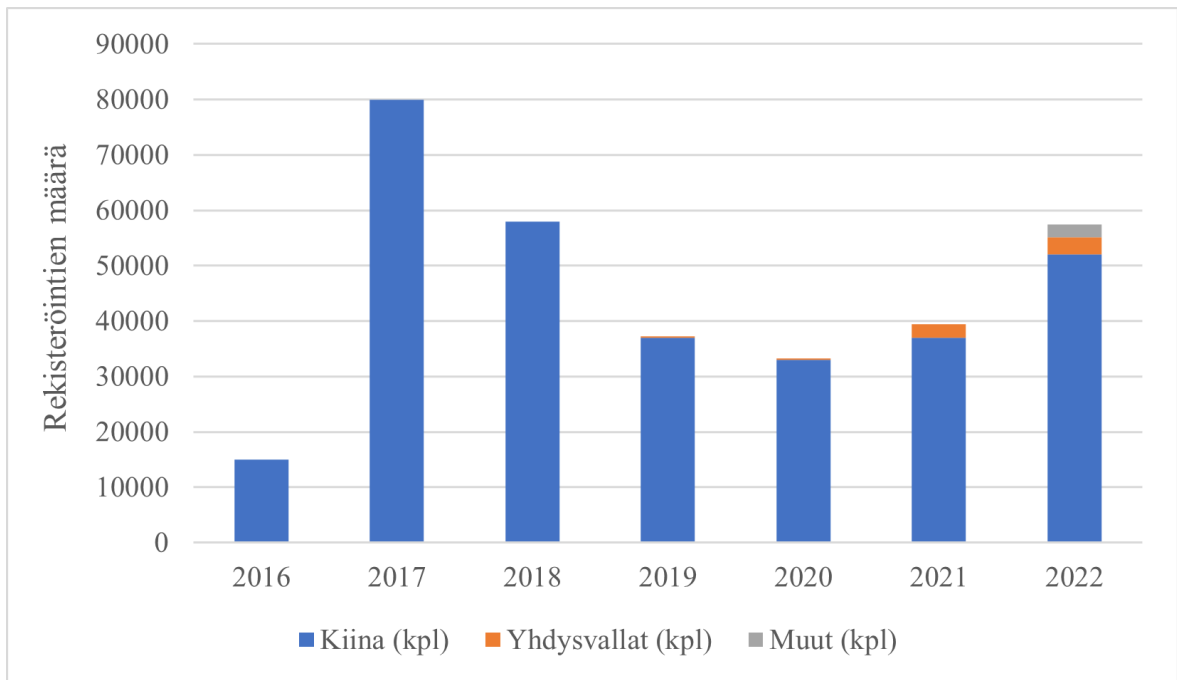
Kuva 1.4. Sähköbussien myynnin osuus Kiinassa ja Yhdysvalloissa (IEA, 2023).



Kuva 1.5. Sähkörekkojen myynnin osuus Kiinassa ja Yhdysvalloissa (IEA, 2023).



Kuva 1.6. Sähköbussien rekisteröinnit maailmalla (IEA, 2023).



Kuva 1.7. Sähkörekkojen rekisteröinnit maailmalla (IEA, 2023).

Datasta huomataan sähkörekkojen määrän jatkuva kasvu sekä myynnin osuuden kasvaminen. Kiina dominoi markkinoita, mutta vähitellen myös Eurooppa ja Yhdysvallat ovat alkaneet ottamaan jalansijaa. Käyrissä huomataan vuosien 2020–2021 kohdalla laskua. Lasku johtuu osittain Venäjän sodasta Ukrainassa ja Covid-19 pandemian aiheuttamista ongelmista globaaleihin toimitusketjuihin (IEA, 2022). Myynnin osuus sekä ajoneuvojen rekisteröinnit ovat lähteneet takaisin nousuun vuonna 2022.

1.2 Tukipolitiikka ja kannustimet Euroopassa

Viimeaikaisten tutkimusten mukaan on ennustettu akkukäyttöisten sähkörekkojen saavutettavan TCO (Total Cost of Ownership) – pariteetin diesel rekkoihin vuoteen 2025 mennessä. Tämä riippuu kuitenkin maasta ja käytettävissä olevista tuista. Korkeat etukäteiskustannukset voivat silti edelleen aiheuttaa tulevaisuudessa ongelmia. (T&E, 2022.)

Raskaan sähköisen liikenteen sähköistäminen vaatii väliaikaisesti taloudellisia kannustimia tuotantomäärien kasvaessa. Nollapäästöteknologian ja dieselin välistä eroa voidaan pienentää esimerkiksi alemmilla lataus/polttoaine- ja korjauskustannuksilla, pienemmällä tietulli-

kustannuksilla tai pienentämällä itse ajoneuvojen hintaeroa. Itävalta, Ranska, Saksa, Alankomaat ja Espanja ovat onnistuneet pienentämään diesel- ja nollapäästö kuorma-auton kustannuseroa jopa 80 %. Kun sähköiset raskaan liikenteen ajoneuvot ovat saavuttaneet TCO-pariteetin, voidaan tukia asteittain vähentää. Taulukossa 1.3 on listattu Euroopan 16 maakohtaista biopolttoaine- ja nollapäästörekkojen ostokannustinta. Hintaerolla tarkoitetaan hintaa verrattuna diesel rekkaan. (T&E, 2022.)

Taulukko 1.3. Biopolttoaine- ja nollapäästörekkojen rahoitusohjelmat Euroopassa (T&E, 2022).

Maa	Rahoitusohjelma	Voimansiirron tyyppi	Tuki per ajoneuvo
Alankomaat	AanZET	Akku ja vetypolttokenno	Max. 60 % hintaerosta
Belgia	Ecologiepremier+	Akku ja vetypolttokenno	80 % hintaerosta (Akku) tai 45 % hintaerosta (vetypolttokenno)
Espanja	Royal Decree 983/2021	Akku, vetypolttokenno ja ladattavat hybridit	190 k€ ostohinnasta (pienet ja keski-suuret yritykset) ja 130 k€ (suuret yritykset)
Irlanti	Alternatively fueled heavy-duty vehicle purchase grant scheme	Akku, vetypolttokenno, ladattavat hybridi ja kaasu	Max. 60 % hintaerosta (500 k€ raja per yritys)
Italia	Ministerial decree (GU Serie Generale n.17 del 22-01-2022)	Akku, vetypolttokenno ja kaasu	24k€ (yli 7 t rekat) ja 14k€ (alle 7 t rekat)
Itävalta	Emissionfreie Nutzfahrzeuge und Infrastruktur	Akku ja vetypolttokenno	Max. 80 % hintaerosta
Kroatia	Public Call for co-financing of energy-efficient vehicles	Akku, vetypolttokenno, ladattavat hybridi ja kaasu	Max. 53 k€
Malta	Grant scheme for the purchase of electric vehicles	Akku	Max. 40 % ostohinnasta ja Max. 250 k€ riippuen yrityksen koosta

Puola	Funduszu Niskoemisijnego Transportu	Akku, vetypolttokenno ja kaasu	Ei tiedossa
Ranska	France Relance and Ademe	Akku ja vetypolttokenno	Max. 65 % hintaerosta
Ruotsi	Klimatpremien	Akku, vetypolttokenno, bioetanoli ja kaasu	Max. 20 % ostohinnasta tai 40 % hintaerosta
Saksa	Klimashonenden Naturfahrzeugen und Tank- und Ladeinfrastruktur	Akku, vetypolttokenno ja kaasu	Max. 80 % hintaerosta
Suomi	Regulation (1289/2021)	Akku ja kaasu	6–50 k€ riippuen ajoneuvon painosta
Tanska	Udmøntning af pulje til grøn transport	Akku, vetypolttokenno, ladattavat hybridi ja kaasu	Max. 60 % hintaerosta
Tšekki	Call No. 3/2022: Ecomobility	Akku	Max. 41 k€ tai 50 % ostohinnasta
Yhdistynyt kuningaskunta	Plug-in Van and Truck Grants	Akku, vetypolttokenno ja kaasu	Max. 20 % ostohinnasta

Myös rahoitus latausinfrastruktuuriin on keskeinen osa sähköiseen liikkumiseen siirtyessä. Latausinfrastruktuurin rakentaminen vie kuitenkin paljon aikaa. Erityisesti aikaa vievät asentaminen ja latausverkon suunnittelu. Vankka latausverkosto tulisi olla jo olemassa ennen sähköisten raskaiden ajoneuvojen laajamittaista käyttöönottoa. Tällä hetkellä julkisia latauspisteitä raskaille ajoneuvoille on kuitenkin hyvin vähän tarjolla. (ZEVTC, 2022.)

16 EU maasta, joilla on sähköisille ajoneuvoille rahoitusohjelma, vain 12 maata tarjoaa tukea latausinfrastruktuurin rakennuttamiselle sähköisille raskaille ajoneuvoille. Se tarkoittaisi latausasemia, joiden teho olisi vähintään 80 kW yölataukseen, 150 kW tilaisuuslataukseen (eng. Opportunity charging) ja 350 kW pikalataukseen. 12 eri tukiohjelmaa on listattuna taulukkoon 1.5. (T&E, 2022.)

Taulukko 1.4. Raskaan liikenteen latausinfrastruktuurin rahoitusohjelmat Euroopassa (T&E, 2022).

Maa	Rahoitusohjelma	Budjetti	Tuki per laturi
Belgia	Ecologiepremie+	3 M€ /vuodessa	30 % hinnasta yli 50 kW latu- reille
Espanja	Royal Decree 983/2021	150 M€	40 % hinnasta ja max. 70 k€ tuki yli 350 kW latureille
Italia	Gazette Ufficiale n.251 del 20 ottobre 2021	90 M€	40 % hinnasta ja max. 75 k€ tuki yli 100kW latureille
Itävalta	Emissionfreie Nutzfahrzeuge und Infrastruktur	62 M€	40 % hinnasta ja max. 30 k€ tuki yli 100 kW latureille
Puola	Funduszu Niskoemisyjnego Transportu	Ei tiedossa	Ei tiedossa
Ranska	Advenir	127 M€	60 % hinnasta ja max. 960 k€ tuki yli 4.000 kVA latureille
Ruotsi	Klimatklivet	150 MSEK	40 % hinnasta yli 50 kW la- tureille
Saksa	Klimaschonende Nutzfahrzeuge und infrastructure	80 M€	80 % hinnasta
Suomi	Decree under Act on Discretionary Government Transfer	13.2 M€	Tulossa
Tanska	Udmøntning af pulje til grøn transport	72 MDKK	Tulossa
Tšekki	Call No. 3/2022: Eco-mobility	N/A	50 % hinnasta (Max. ~41 k€)
EU	Alternative Fuel Infrastructure Facility	1.575 mrd€	Max. 60 k€

Tukien laajuudessa ja määrässä on paljon parannettavaa. Euroopassa tukien painopiste on edelleen henkilöautojen sähköistämässä, eikä latausinfrastruktuuri sovellu yhtä hyvin raskaille ajoneuvoille. Latausinfrastruktuuri vaatii raskaille ajoneuvoille suunniteltuja latauspaikkoja sekä suurempaa lataustehoa. Toimivaa tukipolitiikkaa tarvitaan latausinfrastruktuurin rakentamiseen ja raskaan liikenteen sähköistämiseen. (T&E, 2022.)

EU:n tasolla raskaan liikenteen latausinfrastruktuurin tavoitteita edistää AFIR-asetus sekä AFIF-rahoitusväline. Niiden tarkoitus on luoda raskaan liikenteen latausverkosto Eurooppaan vuoteen 2025 mennessä. (T&E, 2022.)

2 Teknologian haasteet ja kehitys

Tämä luku käy läpi raskaan liikenteen teknologiat ja niihin liittyvät haasteet. Luvussa tutkitaan muun muassa akkuteknologiaa, latausteknologiaa ja -infrastruktuuria, sähkömoottoreita sekä sähköverkkoon aiheutuvaa kuormaa. Vetymoottorilla tai vetypolttokennolla toimivia raskaita ajoneuvoja tutkitaan vaihtoehtoisena vihreänä teknologiana akuille. Lopuksi vertaillaan tämänhetkistä raskaan liikenteen kalustoa markkinoilla. Suuri osa raskaan liikenteen sähköistymiseen liittyvistä teknologioista on vielä kehitysvaiheessa.

2.1 Akkuteknologia ja siihen liittyvät haasteet

Akkukäyttöiset ja vetypolttokennolliset sähkörekat ovat kaksi saatavilla olevaa vihreää vaihtoehtoa verrattuna perinteiseen polttomoottorilla toimivaan raskaaseen ajoneuvoon (Cunanan et al., 2021).

Akut ja polttokennot muuntavat kemiallisen energian sähköksi, mutta niiden kennot toimivat eri tavalla. Akut eroavat polttokennoista muun muassa siten, että polttokennoihin syötetään jatkuvasti aktiivista ainetta (vetyä), kun taas akuissa aktiivinen materiaali on varastoituna järjestelmään. Akkukäyttöisten kuorma-autojen akut koostuvat usein lithiumionikenoista niiden suuren energia- ja tehotiheyden ja pitkän käyttöiän vuoksi. Vetypoltto-

kenno kuorma-autot käyttävät usein PEMFC (Proton-exchange membrane fuel cell) poltto-kennoja suuren tehотиheyden ja kylmäkäynnistysominaisuuksien vuoksi. (Cunanan et al., 2021.)

Akkukäyttöisten sähkörekkojen kiistaton etu on niiden energiatehokkuus ja suuri hyöty-suhde, kun taas polttokennollisten rekkojen etu on niiden vähäinen menetys kuormassa pitkällä kantamalla ja vedyn suuri energiatiheys. Taulukossa 2.1 vertaillaan Akku- ja polt-tockennoteknologiaa raskaissa ajoneuvoissa:

Taulukko 2.1. Akku- ja polttokennoteknologian vertailu raskaissa ajoneuvoissa (Kearney, 2022) ja (Senza, n.d.).

	Vetypolttockenno	Akku
Suurin ennustettu kan-tama	1,200 km	800 km
Hyötykuorma	Kuorman menetys: 1–1,5 t	Kuorman menetys: 3,3–3,8 t
Energia- ja polttoaine-tehokkuus	Energiatehokkuus: 25–35 % Polttoaineenkulutus: 275–375 kWh/ 100 km (6,5–7,8 kg H ₂ / 100 km)	Energiatehokkuus: 70–75 % Polttoaineenkulutus: 100–130 kWh/ 100 km
lataus- ja tankkausai-ka	5–15 min	8 tuntia (yön yli) 1.5 tuntia (kohteessa) 45 minuuttia (suuritehoinen lataus)
Polttoaineen hinta per km	0.39–0.55 €/km	0.16–0.23 €/km
Investointikustannukset	160–345 k€	165–215 k€
Energiatiheys (Senza, n.d.)	Noin 40 $\frac{kwh}{kg}$	Noin 0.25 $\frac{kwh}{kg}$

2.1.1 Akkukäyttöinen sähkörekka

Akkukäyttöisen sähkörekan suuren energiatehokkuuden ansiosta, se tarvitsee puolet vähemmän sähköä kuin vihreällä vedyllä toimivat kuorma-autot. Euroopassa sähkörekkojen ei tarvitse kestää tuhansien kilometrien pituisia matkoja, sillä lähes 80 % maanteiden tavaraliikenteestä Euroopassa suoritetaan alle 800 kilometrin matkoilla. Jatkuvasti tihenevän latausverkoston ansiosta sähkörekat voivat latautua kuljettajan pakollisten lepoaikojen aikana. Energiantiheyden parantuessa on ennustettu akkukäyttöisten sähkörekkojen menettävän alle puoli tonnia hyötykuormaa vuoteen 2025 mennessä. (Transport & Environment, 2021.)

Raskaiden ajoneuvojen akkujen kapasiteetin kasvussa ei ole huomattavissa selkeää kasvua. Alla taulukko, joka kuvastaa keskimääräistä akun kapasiteetin kehitystä kuorma-autoissa:

Taulukko 2.2. Keskimääräinen akun kapasiteetti keskiraskaissa ja raskaissa kuorma-autoissa (IEA, 2023).

Ajoneuvoluokka	Keskimääräinen akun kapasiteetti (kWh)				
	2019	2020	2021	2022	Muutos (2019–2022)
Keskiraskas kuorma-auto	124	139	99	92	-26 %
Raskas kuorma-auto	293	232	372	311	6 %

Litiumioniakkukkenno koostuu katodista ja litiumanodista, sekä erottimesta ja elektrolyyttiliuoksesta. Purkauksen ja varauksen aikana elektrolyytit kuljettavat litiumioneja katodilta anodille ja päinvastoin erottimen kautta, mikä synnyttää sähkövirran. BEV:n voimansiirto koostuu akusta, DC/AC-inverteristä ja sähkömoottorista. Tämä voimansiirto on hyvin yksinkertainen, sillä siinä on vähän mekaanisesti liikkuvia osia. Tästä syystä BEV-ajoneuvojen ylläpitokustannukset ovat 20–30 % pienemmät verrattuna perinteisiin kaasu- ja dieseliakkuihin ajoneuvoihin. (Cunanan et al., 2021.)

Litiumionikemien teknologia on kehittynyt paljon. 1990-luvulla litiumionikemien tehoitehuys oli noin $80 \frac{\text{Wh}}{\text{kg}}$ ja nykyään kaupalliset kemot ovat noin $300 \frac{\text{Wh}}{\text{kg}}$. Kiinan tiedeakatemian yliopistossa onnistuttiin saavuttamaan ensimmäistä kertaa jopa yli $700 \frac{\text{Wh}}{\text{kg}}$ litiumionikemio (Isabelle, 2023.)

Raskaiden kuorma-autojen ja linja-autojen kWh-tarve kilometriä kohden on noin $1,1 - 1,3 \frac{\text{kWh}}{\text{km}}$ ajoneuvotyypin mukaan (Panayi, 2019). $300 \frac{\text{Wh}}{\text{kg}}$ kemnoilla ja $1,2 \frac{\text{kWh}}{\text{kg}}$ kWh-tarpeella tarvittaisiin 4 kg litiumionikemioja kilometriä kohden $\frac{1,2 \frac{\text{kWh}}{\text{km}}}{300 \frac{\text{Wh}}{\text{kg}}} = 4 \frac{\text{kg}}{\text{km}}$. Jos rekalla halutaan matkustaa 1000 km matka tarvittaisiin akku, jonka paino olisi $4 \frac{\text{kg}}{\text{km}} \cdot 1000 \text{ km} = 4000 \text{ kg}$. Jos polttomoottorilla toimiva rekka painaa 13000 kg olisi akku noin 30 % rekan kokonaispainosta $\frac{4000 \text{ kg}}{13000 \text{ kg}} \approx 30 \%$. Painava akku sekä EU:n asettamat painorajat raskaille ajoneuvoille aiheuttavat ongelmia kuorman hallinnan kanssa.

Euroopan komissio pyrkii uudella ehdotuksella kiihdyttämään raskaan liikenteen sähköistämistä. Komissio auttaa sähköisten raskaiden ajoneuvojen valmistajia akkujen lisäämän painon kanssa muun muassa lisäämällä sähkö- ja vetyautojen painorajaa neljällä tonnilla. Uusi maksimi painoraja olisi 40 tonnin sijaan 44 tonnia. (Directive 96/53/EC 2023.)

Kuormanhallinnan lisäksi haasteita ovat kriittisten mineraalien riittävyys sekä akun hyötysuhde kylmällä säällä. Kylmän sään vaikutus on kuitenkin pienempi kuin luulisi. Kuorma-autoissa on ominaisuuksia, jotka pitävät akun optimaalisessa lämpötilassa (+25 C°). Volvon rekoissa kantama laskee -10 C° lämpötilassa noin 3 % ja -20 C° lämpötilassa 10 %. Kylmä sää vähentää kuorma-auton kantamaa sillä ohjaamo täytyy lämmittää akun energialla. Mineraalien riittävyys ei tule aiheuttamaan ongelmia lyhyellä aikavälillä, mutta pitkällä aikavälillä tulisi harkita vaihtoehtoisia mineraaleja, sekä lisätä kierrätysmateriaalien käyttöä. (Mårtensson, 2022.)

Eurooppalaiset ja pohjoisamerikkalaiset sähköbussien ja kuorma-autojen valmistajat ovat vahvasti riippuvaisia aasialaisista akkuvalmistajista. Yli 95 % Kiinassa valmistetuista raskaista kuorma-autoista oli varustettu LFP (Lithium Iron Phosphate) akuilla vuonna 2021. LFP-akkujen kestävyys, pitkä käyttöikä ja alhaisemmat kustannukset tekevät niistä suosituimman valinnan. Erityisesti akkujen korkea hinta on suuri huolenaihe kuorma-autojen

ostajille: yli puolet kuorma-autojen hankinnoista turvautuu lainoihin tai ovat leasing ajoneuvoja. (IEA, 2023.)

LFP akun etuja verrattuna sen pääkilpailijoihin NMC (Nickel Manganese Cobalt) ja NCA (Nickel Cobalt Aluminum). (OrangeEV, 2023):

- **Korkeampi kapasiteetti ikääntyessä:** LFP akut säilyttävät usein ikääntyessään noin 90 % kapasiteetistaan verrattuna esimerkiksi NMC akkuihin, joiden kapasiteetti laskee usein alle 80 %.
- **Turvallisempi, vähemmän altis ylikuumentumiselle ja tulipaloille:** LFP akkujen vakaampi kemia tekee lämpökarkaamisesta paljon vähemmän todennäköisempää jopa pikalatauksen aikana. Toisin kuin NMC akut, LFP akut eivät tarvitse monimutkaisia jäähdytysjärjestelmiä.
- **Ympäristöystävällisempi:** LFP akut eivät sisällä kobolttia ja nikkeliä, jotka ovat myrkyllisiä metalleja ja joita usein louhitaan epäeettisesti: Ne on myös huomattavasti helpompi kierrättää.

2.1.2 Vety polttomoottori ja -kenno

Vetykäyttöisiä ajoneuvoja on kahta tyyppiä: Vety polttoajoneuvot, joissa on vety polttoaineella toimiva polttomoottori (eng. Hydrogen Internal Combustion Engine, H2ICE) ja vety polttokennoajoneuvot, joissa on vety polttokennolla (eng. Fuel Cell, FC) toimiva sähkömoottori. Kummatkin käyttävät vetyä polttoaineena, mutta vetymoottori kykenee toimimaan epäpuhtaan vedyn kanssa. Tämä on erityisen hyödyllistä kuljetusalalla, jossa siirtyminen korkealaatuiseen vihreään vetyyn vie aikaa. Vetymoottorista on hyötyä ajoneuvon valmistajille suunnittelussa ja tuotannossa sillä se on rakennettu tunnetun polttomoottoritekniikan varaan. Haittana on kuitenkin typen oksidien vapautuminen, joka vaatii pakokaasujen käsittelyä NO_x-päästöjen vähentämiseksi. (Kamil et al., 2022.)

Vety polttomoottorissa vetyä poltetaan samalla tavalla kuin perinteinen polttomoottori polttaa bensiiniä tai dieseliä. Vetyä syötetään korkeapainesäiliöstä moottorin polttokammioon, jossa se sekoittuu ilman kanssa. Sytytystulppa sytyttää seoksen ja polttokammioon syntyy paine, joka liikuttaa mäntiä, jotka pyörittävät kampiakselia. Vety polttomoottori ei kuiten-

kaan voi toimia dieselillä sillä dieselmoottorit toimivat puristussytytyksellä, joten niissä ei ole sytytystulppia. (Nebergall, 2022a.)

Vetypolttokennoajoneuvot (FCEV) tuottavat sähköä vetypolttokennoissa. Vetypolttokennot ovat sähkökemiallisia laitteita, jotka muuttavat vedyn kemiallisen energian sähköksi, lämmöksi ja vedeksi. Kuten akkukäyttöiset ajoneuvot ne ovat nollapäästöisiä koska energian tuottaminen ei vaadi polttamista. Protoninvaihtokalvoa käytetään vetysäiliöstä tulleiden vetyatomien ionisointiin anodilla. Kalvon läpi kulkevat vetyprotonit reagoivat hapen kanssa ja muodostavat vettä sivutuotteena. Vetypolttoaineesta irrotettuja elektroneja voidaan hyödyntää ajoneuvon sähkömoottorin tehontuotannossa tai akun lataamisessa. (Cunanan et al., 2021.)

Vetypolttomoottorit ovat yleensä tehokkaimpia suurella kuormituksella ja vetypolttokennot ovat tehokkaimpia pienemmällä kuormituksilla. Polttomoottori on siis yleensä ihanteellinen ja tehokas valinta raskaille kuorma-autoille, jotka kuljettavat suuria kuormia. Ajoneuvot, jotka toimivat pienemmällä kuormalla, kuten hinausautot tai betoninsekoitinrekat ovat usein tehokkaampia polttokennoilla. Polttokennolliset ajoneuvot voivat myös kerätä energiaa regeneratiivisen jarrituksen avulla, mikä parantaa niiden tehokkuutta. (Nebergall, 2022b.)

Clean Air Task Forcen julkaisemassa raportissa tutkitaan akkukäyttöisten ja polttokennollisten rekkojen suoriutumista samalla 5255 km pituisella matkalla. Raportissa todetaan, että pitkän matkan reiteillä polttokennoteknologia suoriutuu paremmin. Akkukäyttöinen rekka joutui lataamaan 8 kertaa kun taas polttokennollinen rekka selvisi 3 tankkauksella. Akun lataamiseen kului yhteensä 43.8 tuntia kun taas vetysäiliön tankkaamiseen 1.4 tuntia. Lisäksi mahdollinen kuljetettava kuorma oli suurempi polttokennollisessa rekassa kuin akkukäyttöisessä rekassa. (Thomas, 2023.)

Polttokennollisen raskaan ajoneuvon kantama riippuu hyötykuormasta, mutta myös ajoneuvoon varastoidun vedyn määrästä. Tyypillinen polttokennollinen raskas ajoneuvo pysyy saavuttamaan noin 800–1600 kilometrin kantaman yhdellä tankkauksella ja kahdella vetysäiliöllä, jotka kuljettavat kumpikin 40–60 kg vetyä 350 baarin paineella. Vetysäiliöiden tankkausaika on noin 120 grammaa per sekunti ja kokonaisaika 16min. (Cunanan et al., 2021.)

Vetyajoneuvojen käytettävissä oleva infrastruktuuri on kuitenkin hyvin niukka. Vuoden 2018 lopussa maailmanlaajuisesti oli toiminnassa vain 370 vetytankkausasemaa, joista suurin osa Euroopassa, Japanissa ja Amerikassa. Infrastruktuurin puute on johtanut korkeisiin polttoainekustannuksiin ja korkeisiin ajoneuvojen pääomakustannuksiin (Cunanan et al., 2021). Suomessa ei tällä hetkellä ole toiminnassa olevaa vedyn tankkausasemaa. Energiaviraston jakamien tukien avulla asemia tullaan kuitenkin rakentamaan Vuosaaren satama-alueelle ja Vantaankoskelle (Energiavirasto, 2023.)

Niukan infrastruktuurin lisäksi haasteita ovat muun muassa (Hassan et al., 2023):

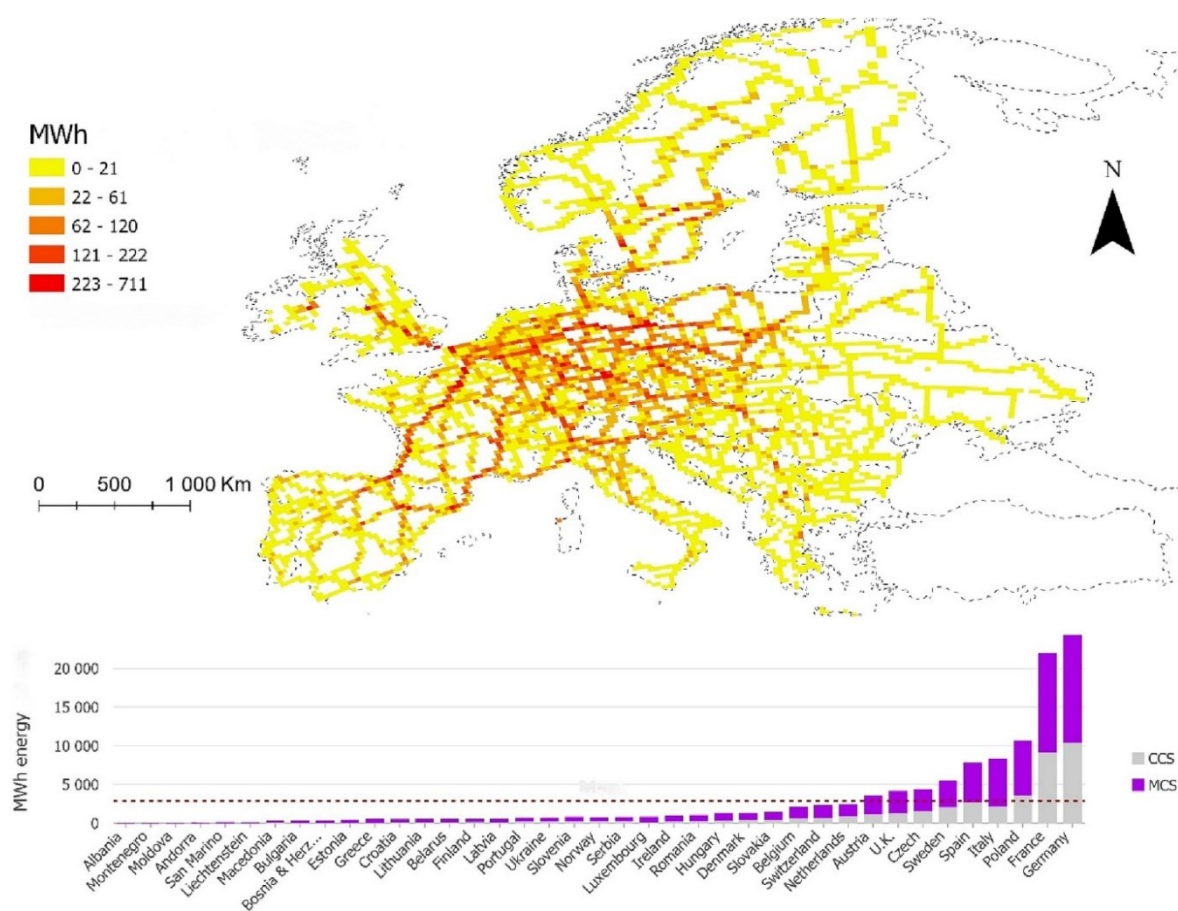
- **Taloudelliset haasteet:** Ajoneuvojen hinnat ovat korkeat johtuen kalliista vedystä ja kalliista polttonennojärjestelmästä.
- **Energiatehokkuus:** Johtuen polttonennojärjestelmän energiahäviöistä FCEV ajoneuvot ovat vähemmän tehokkaita kuin BEV ajoneuvot.
- **Turvallisuusongelmat:** Koska vety on erittäin herkästi syttyvä kaasu, aiheuttaa se varastointiin, käsittelyyn ja tankkaukseen liittyviä haasteita.
- **Kilpailu akkukäyttöisiä sähkörekkoja vastaan:** Akkukäyttöiset sähkörekat ovat selkeästi edellä kilpailussa ja infrastruktuuri on huomattavasti kehittyneempi. Vetykäyttöisiä ajoneuvoja on myös erittäin rajallisesti saatavilla tällä hetkellä.

Kun sähköä käytetään vedyn tuottamiseen elektrolyysillä, ympäristövaikutukset riippuvat suuresti verkon energialähteestä. Vetyä tuotetaan tällä hetkellä pääasiassa fossiilisista polttoaineista, mutta uusiutuvan sähkön avulla voitaisiin hiilijalanjälkeä vähentää jopa 90 %. (Pardhi et al., 2023.)

2.2 Sähköverkon kapasiteetin tarve

Wasim (2023) simuloi tutkimuksessaan akkukäyttöisten sähkörekkojen latauskapasiteetin tarvetta Euroopassa vuonna 2030. Jos 15 % pitkän matkan kuorma-autoista olisi sähköisiä, tarvittaisiin julkisilla pysäkeillä jopa 110 GWh energiaa päivässä tai 1 MWh kuorma-autoa kohden. Tietyillä latausalueilla vaadittaisiin jopa 544 MWh kuorma-autojen päivittäiseen

lataukseen ja latauksista 65 % tapahtuisi Keski-Euroopan maissa kuten Saksassa, Ranskassa, Puolassa, Espanjassa ja Italiassa. Jos raskas liikenne olisi kokonaan sähköinen tarvittaisiin jopa 540 GWh tehoa päivittäin. Kuva 2.1 kuvastaa Euroopan tieverkon latauspisteiden päivittäistä energiantarvetta, jos 15 % pitkän matkan kuorma-autoista olisi sähköisiä. (Wasim et al., 2023.)



Kuva 2.1 Euroopan tieverkon päivittäinen energiantarve MCS ja CCS latauksesta (Wasim et al., 2023).

TEN-T-verkko määrittelee Euroopan tärkeimmät liikenneväylät ja se voidaan jakaa ”Core” ja ”Comprehensive” tieverkkoon. Core tieverkkoon kuuluu Euroopan tärkeimmät liikenneväylät ja Comprehensive tieverkkoon kuuluu muut liikenneväylät. Taulukosta 2.3 nähdään esimerkiksi TEN-T Core verkon latauskeskittymien kokonaislatausteho kevyille ja raskail-

le 60–100 km välein. Vuonna 2025 kokonaislatausteho tulisi olla noin 1,8 MW. (Karsten, 2023.)

Taulukko 2.3. AFIR sopimuksen vaadittu latausteho kevyille ja raskaille ajoneuvoille (Karsten, 2023).

		TEN-T Core			TEN-T Comprehensive		
		2025	2030	2035	2025	2030	2035
Hyväksytty Euroopan komissiolta 28.03.2023	Vuosi	2025	2030	2035	2025	2030	2035
	Tiheys	latauspiste 60–100 km välein			latauspiste 60–100 km välein		
	Kevyt ajo- neuvo	400 kW	600 kW	-	-	300 kW	600 kW
	Raskas ajo- neuvo	1400 kW	3600 kW	-	1400 kW	1500 kW	1500 kW
	Yhteensä	1800 kW	4200 kW	-	1400 kW	1800 kW	2100 kW

Taulukossa näkyvät kapasiteettiluvut ovat voimassa yhden ajosuunnan latauskeskuksissa. Jos molemmat kulkusuunnat on yhdistetty yhteen verkkoliitäntäpisteeseen, luvut kaksinkertaistuvat ja vaativat jopa 8,4 MW kapasiteetin. Tällä tehoalueella latausalueet vaativat ainakin keskijännitetaso verkkoa liitäntäpisteisiin (yleensä 10–35 kV). Suuremmat lataustehot voivat vaatia verkkoliitäntäpisteitä korkeajännitetasolle (yli 36 kV). Yleistys ei kuitenkaan ole mahdollista ja paras verkkoliitäntäpiste on tunnistettava jokaiselle sijainnille erikseen. (Karsten, 2023.)

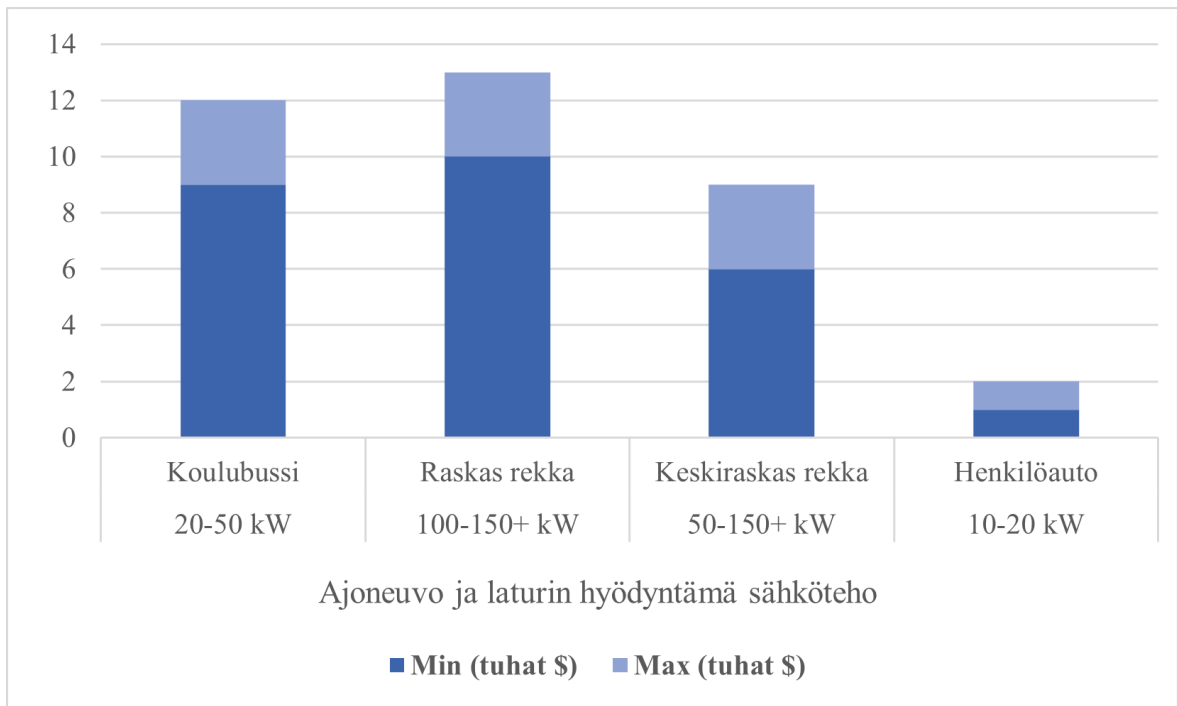
Verkon suunnittelussa täytyy ottaa huomioon, että laturin nimellisteho sähköverkon puolella on hieman suurempi kuin pistorasian puolella. Tehon täytyy kattaa esimerkiksi laturin häviöt ja lisälaitteiden jäähdytys. Tästä syystä vaadittu verkkokapasiteetti ylittää DC puolen lataustehon vähintään 10 %. (Karsten, 2023.)

2.2.1 Vehicle-to-Grid

Vehicle-to-Grid sallii pysäköidyn ajoneuvon palauttaa energiaa sähköverkkoon, kun se on kytketty laturiin. Ostamalla halpaa energiaa, varastoimalla sitä ja myymällä se takaisin sähkölaitokselle kalliimpana, sähköajoneuvojen omistaja voi toimia energiakauppiana. V2G on hyödyllistä myös sähkölaitokselle, sillä sähkön tuottaminen ja jakelu voi ruuhka-aikoina olla erittäin kallista. Teknologian avulla sähköajoneuvojen omistajat voivat hyödyntää akku- ja laturiomaisuuttaan ansaitakseen lisätuloja. (ChargeSim, 2021.)

Kuorma-autot ovat hyvä valinta V2G teknologialle, sillä niillä on ennustettavissa olevat aikataulut ja suuret akut. Ongelmana on, että kuorma-autot ovat huomattavasti vähemmän aikaa pysäköitynä kuin henkilöautot. Jatkuvasti liikkeellä olevilla ajoneuvoilla jää vähemmän tunteja energiakauppaa varten. (ChargeSim, 2021.)

McKinseyn tekemässä tutkimuksessa Kaliforniassa raskas kuorma-auto, keskiraskas kuorma-auto ja koulubussi osoittivat potentiaalia ansaita 7 000–12 000 dollaria vuodessa ajoneuvoa kohti V2X (vehicle-to-everything) käyttötapauksissa. Sanalla ”everything” tarkoitetaan kaikkia kohteita, joihin ajoneuvon akun sähkötehoa voidaan hyödyntää. Akkujen sähkötehoa voidaan sähköverkon lisäksi hyödyntää esimerkiksi kodeissa, rakennuksissa tai ulkoisissa kuormissa. Tutkimuksessa ajoneuvot hyödynsivät suurta akkukapasiteettia ja DC pikalatausinfrastruktuuria maksimoidakseen saadut tulot ja säästöt. Koulubussit ovat Kaliforniassa ja Massachussetsissa muita hyötyajoneuvoja edellä V2X-teknologian käyttöönotossa. (Fröde et al., 2023.)



Kuva 2.2. Potentiaalinen vuotuinen V2X-tulo Kaliforniassa (Fröde et al., 2023).

Kuvasta 2.2 nähdään raskaiden ajoneuvojen mahdollisia tuottoja V2X teknologialla verrattuna henkilöautoon. Kyseinen tutkimus oli toteutettu Kalifornian alueella, mutta tulopotentiaali saattaa huomattavasti vaihdella alueittain. Tutkimuksen tulokset osoittivat myös, että akun kapasiteetti sekä lataus- ja purkausnopeus ovat merkittävien tekijä tulopotentiaaliin: 10 % lisäys kapasiteetissa ja latausnopeudessa kasvatti tuloja noin 10 %. Raskaan hyötyajoneuvokaluston palveluyrityksien tulisi arvioida kaksisuuntaisten DC-laturien investointikustannuksien kannattavuus ja paljon olisi mahdollista ansaita V2X teknologialla. Sertifioituja kaksisuuntaisia latureita ei ole tällä hetkellä saatavilla monia, ja ne ovat huomattavasti kalliimpia kuin samantyyppiset yksisuuntaiset DC-laturit. (Fröde et al., 2023.)

2.3 Latausmenetelmät ja latausinfrastruktuuri Euroopassa

Raskaiden ajoneuvojen latausstrategiat vaihtelevat yleensä yön yli tapahtuvan latauksen, kohdelatauksen ja ”on-the-move” latauksen välillä. Se kuinka kauan lataaminen kestää riippuu myös näistä erilaisista latausskenaarioista (Ventoniemi et al., 2023):

- Yön yli lataus on yleisin latausskenaario. Kalustoa voidaan ladata yön yli alhaisella 50–100 kW DC teholla. Tämä toimii hyvin, koska yöllä on normaalisti 6–8 tuntia aikaa ladata ajoneuvot täyteen. Kuorma-autojen latauksen hallintaohjelmistojen avulla on mahdollista säästää energiakustannuksia.
- Kohdelataus on tarpeen ajoneuvoille, joiden toimintasäde on pienempi kuin niiden päivittäinen ajomatka. Lataus voi tapahtua esimerkiksi logistiikkakeskuksissa tai varastoissa. 150–400 kW tehoa käytetään kuorma-autojen lataamiseen noin 30–120 min latauksen ja purkamisen aikana.
- On-the-move latausta tarvitaan kaupunkien solmukohtissa ja moottoriteillä pitkän matkan rekoille. EU:n säätelemien pakollisten 30–45 minuutin ajotaukojen tehokkuuteen hyödyntämiseen tarvitaan jopa 1,2 MW tehoa ajoneuvojen lataamiseen.

Alternative Fuel Infrastructure regulation (AFIR)-asetuksen myötä EU on esittänyt maailman kunnianhimoisimman lain sähköisen raskaan liikenteen latausinfrastruktuurille. Viimeistään vuoteen 2030 mennessä EU:n päätieverkosto varustetaan latausasemilla 60–100 kilometrin välein, mikä mahdollistaa sähköisten kuorma-autojen liikennöinnin aivan kuten niiden dieselledeltäjät tekevät nykyään. Lisäksi AFIR takaa myös vedyn tankkausasemaverkoston vuoteen 2030 mennessä. (T&E, 2023.)

Chalmersin teknillisessä korkeakoulussa tehdyn tutkimuksen päätavoitteena oli tutkia julkisten latauspisteiden määrää Euroopassa täyttääkseen vuoden 2030 sähköisen raskaan liikenteen latausvaatimukset. Tutkimus toteutettiin simuloimalla ja siinä otettiin huomioon rekkojen tyypilliset ajomatkat sekä niiden lataustarve. Perustuen energiankulutusoletuksiin ja CCS/MCS latureiden lataustehoihin (60 kW ja 1100 kW) tulisi akkukäyttöiset sähkörekat varustaa 435 km toimintasäteellä ja 750 kWh:n akulla. (Wasim et al., 2023.)

Analyysi pitää sisällään 4160 latausaluetta joista 45 % sijaitsee Ranskassa, Saksassa, Espanjassa, Italiassa ja Ruotsissa. Latausalueet ovat noin 25–35 kilometrin etäisyydellä toisistaan ja kattavat suurimman osan Euroopan moottoriteistä. Latausinfrastruktuurin kehittäminen Keski-Euroopan maissa kuten Saksassa ja Belgiassa, tulisi tehdä mahdollisimman pian sillä maiden läpi kulkee suuria määriä rekkoja. Rekoista yli 100 pysähtyy lataamaan maahan päivittäin ja vaativat keskimäärin yli 53MWh. Laturien asennus sekä sähköverkon

ja sähköhuollon kehittäminen latausalueiden kysyntää vastaavaksi vaatii suuria investointeja. (Wasim et al., 2023.)

Tutkimuksen mukaan keskimääräisellä latausalueella tulisi olla 4–5 kertaa enemmän yön yli (CCS, 50-100kW) latureita kuin megawatin (MCS, 0,7–1,2 MW) latureita tukeakseen 15 % kaukoliikenteen sähkörekkojen osuutta. Tarvittaisiin noin 40 000 CCS- ja 9 000 MCS-laturia, joista keskimäärin 8 CCS ja 2 MCS-laturia latausaluetta kohden. Latausalue lataisi päivittäin 2–11 sähkörekkaa. Alla yhteenveto tutkimuksessa käytettyjen akkukäyttöisten sähkörekkojen matkojen tilastoista (Wasim et al., 2023):

Taulukko 2.4. Yhteenveto BET ajoneuvojen matkojen tilastoista (Wasim et al., 2023).

	Keskiarvo	Standardipoikkeama	Prosenttipiste (persenttiili)			
			25 %	50 %	75 %	99 %
Pysähdysten välinen etäisyys (km)	350	98	326	343	370	435
Tarvittava energia pysähdysten välillä (kWh)	556	155	485	549	636	750
Kokonaismatka-aika (tuntia)	30	19	20	27	38	106
Kokonaismatka (km)	1450	927	826	1230	1785	5130

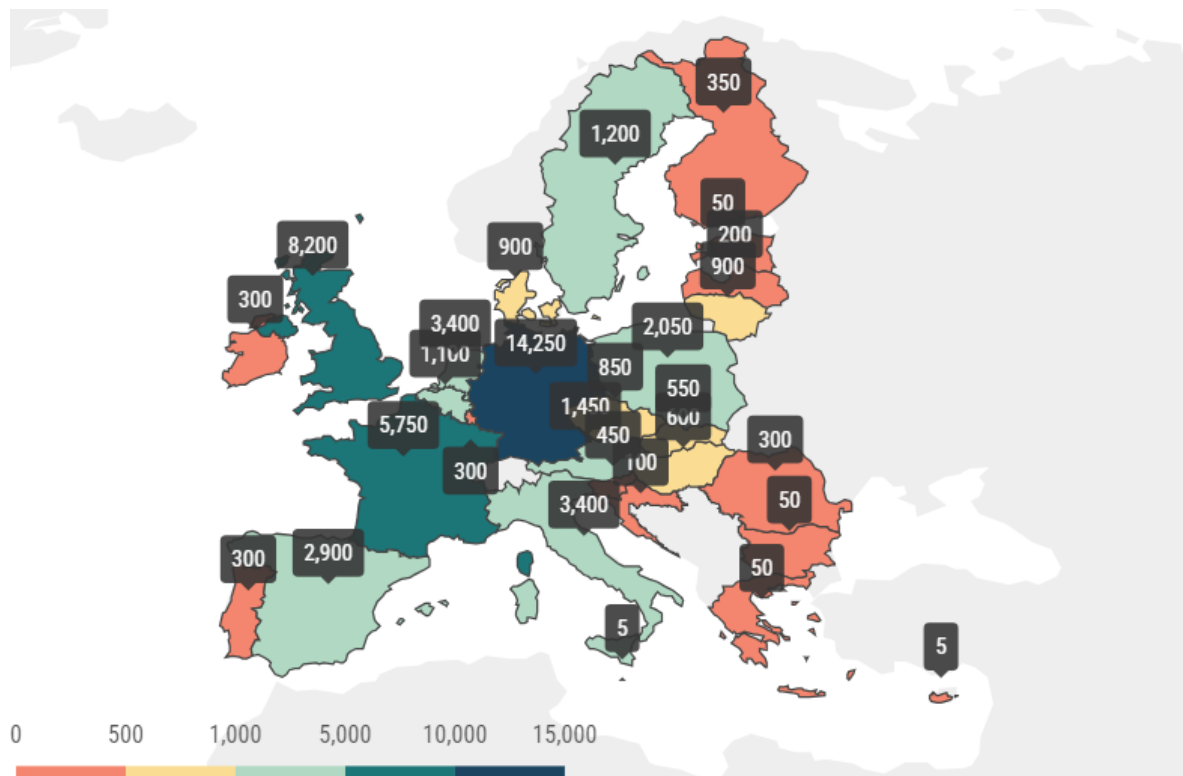
Yleisesti ottaen kaupallisille sähköajoneuvoille on olemassa kaksi päälatausstrategiaa, jotka ovat ”Return-to-Base” ja lataus matkalla. ”Return-to-Base” latausstrategiassa suuritehoinen latausinfrastruktuuri asennetaan kaupallisiin tiloihin (varastot, pihat, teollisuuden mikroverkot jne.), jotta ajoneuvot voidaan ladata täyteen työajan ulkopuolella. Strategia on ollut suosittu vähäisten sopivien julkisten latausasemien puutteen vuoksi. Lataus matkan varrella tulee erityisesti tarpeeseen jatkuvien ajoaikataulujen muutoksilla ja silloin kun paluuaseman tehokapasiteetti ylittyy. (Bassam et al., 2022.)

2.3.1 MCS-lataus

Megawattitason lataus on tärkeää keskiraskaille ja raskaille hyötyajoneuvoille. Isommat ajoneuvot kuluttavat paljon energiaa ja ne täytyy usein saada ladattua nopeasti. Suuritehoisia latauslaitteita kuten MCS (Megawatt Charging System) teknologiaa tarvitaan suurten akkujen nopeaan lataamiseen. Esimerkiksi luokan 8 raskas ajoneuvo vaatisi 1,6 MW:n latauksen 640 km matkalle 30 minuutin tauolla. SAE J3271, jotka kutsutaan myös megawattilatausjärjestelmäksi (MCS), tavoitteena on täyttää raskaan liikenteen latauksen korkeat odotukset. (Argonne, 2023.)

SAE J3271-latausstandardi on tällä hetkellä kehitteillä latureille, jotka voivat tarjota 440 kW (350A/1250vds jäähdyttämätön) aina 3,75 MW (3000A/1250vdc aktiivisesti jäähdytetty) asti. Uusi standardi sisältää standardoidun liittimen, suunnittelun, kommunikaation protokollat ja turvallisuusvaatimukset yhteen toimivuuden mahdollistamiseksi ajoneuvojen, latausverkkojen ja sähköverkon välillä. Uudella MCS standardilla on tarkoitus parantaa edellisen CCS (Combined Charging System) standardin lataustehoa, jota suurin osa yli 3 luokan ajoneuvoista on tähän asti käyttänyt. (Argonne, 2023.)

AFID-direktiivin tavoitteena on rakentaa 40 000–50 000 suurtehoista latauspistettä Euroopan unionin alueelle vuoteen 2030 mennessä. Myös 40 000 alle 100 kW laturia tulisi sijoittaa kuorma-autojen pysäköintialueille. Kuva 2.1 näyttää valtiokohtaisen sähkörekkojen latauspisteiden määrän vuoteen 2030 mennessä (ACEA, 2021.)



Kuva 2.2 Sähkörekkojen latauspisteet vuoteen 2030 mennessä (ACEA, 2021).

Sähkörekkojen latauspisteet ovat selkeästi keskittyneet keski- ja länsi Eurooppaan. Euroopan autonvalmistajien liiton (ACEA) mukaan eniten latauspisteitä tulisi olemaan Saksassa, Ranskassa ja Yhdistyneissä kuningaskunnissa, joista Saksassa ylivoimaisesti eniten. Vähiten latauspisteitä olisi ennusteen mukaan Itä-Euroopan alueella.

2.3.2 Akunvaihto

Verrattuna sähköajoneuvojen lataamiseen, akun vaihtaminen tarjoaa useita etuja. Se perustuu saatavilla olevaan teknologiaan ja mahdollistaa akkujen ja ajoneuvojen erilliset elinkaaret. Varsinainen vaihto täyteen ladattuun akkuun on myös nopea prosessi, joka kestää muutaman minuutin. Suuri haaste on akunvaihtoteknologian täysin uudenlainen liiketoimintajärjestelmä. (VTI, 2023.)

Kiinan hallitus ja sen useat paikallishallinnot ovat kannustaneet akunvaihtotekniikkaa jo vuodesta 2020 lähtien. Akunvaihtotekniikan (eng. Battery Swapping) teknologian osuus

myynnissä on kasvanut runsaasti ja vuonna 2022 Kiinassa myydyistä sähkörekoista 49.5 % toimivat akunvaihtoteknologialla. Näitä ajoneuvoja käytetään pääasiassa lyhyillä matkoilla satamissa, kaivostyömailla ja kaupunkilogistiikassa. Ne on tyypillisesti varustettu 141 kWh:n tai 282 kWh:n akulla, ja niiden tyypillinen matkan pituus on alle 100 km. Maailman suurimpana kuorma-auto markkinana, Kiinan sitoutuminen erilaisiin latausratkaisuihin tarjoaa arvokasta oppia muille markkinoille. (Hongyang et al., 2023.)

Vaikka akunvaihtoteknologia on kasvattamassa suosiotaan Kiinassa, on vielä esteitä selvitettävänä, ennen kuin teknologiaa voidaan laajasti kaupallistaa. Yhtenä haasteena on akkujen standardoinnin puute: Eri valmistajien akut voivat vaihdella muodoltaan, kooltaan ja tavalla, jolla ne kiinnitetään ajoneuvoihin. Tällä hetkellä kuorma-autonkuljettajat voivat siis vaihtaa akkuja vain tietyillä akunvaihtoasemilla. Toisena ongelmana on asemien suuri hinta. Asemien omistajien haastattelujen perusteella akun vaihtoaseman perustaminen maksaa noin 0,9–1 miljoonaa euroa. Puolet kustannuksista koostuu asemalle varastoiduista akuista ja loput tulee laitteista, kaapeleista ja muuntajista. (Hongyang et al., 2023.)

Kiinan ulkopuolella akunvaihtoteknologiaa on kokeiltu vain vähän. Better Place:n ja Tesla:n akunvaihdon kaupallistaminen ei saavuttanut menestystä korkeiden pääomakustannusten ja alhaisen kysynnän takia. Tämän jälkeen keskustelut akunvaihtoteknologiasta Euroopassa ja Yhdysvalloissa ovat hiipuneet. (Bernard et al., 2022) Poikkeuksena voidaan kuitenkin pitää kiinalaista monikansallista yritystä nimeltä Nio. Yritys avasi vuoden 2023 loppupuolella 30. akunvaihtoasemansa Ruotsissa ja suunnittelee lisää asemia Eurooppaan. Yhteensä yrityksellä on 2,217 akunvaihtoasemaa, kun lasketaan mukaan Kiinassa sijaitsevat asemat. (Andrew, 2023.)

2.4 Sähkömoottorit

Sähkömoottorin suuri etu on sen korkea hyötysuhde. Polttomoottorilla hyötysuhde vaihtelee valtavasti, varsinkin vaihtelevan ja osittaisen kuormituksen aikana. Äärimmäisissä tapauksissa hyötysuhde voi laskea jopa alle 15 prosenttiin. Sähkömoottorit ja vaihtosuuntaajat saavuttavat samoissa käyttöolosuhteissa korkeamman tehokkuuden ja jopa 80 prosentin hyötysuhteen. (Infineon, 2020.)

Toisin kuin bensiini- ja dieselautot, joiden on nostettava kierroksia ennen kuin saavuttavat suurimman vääntömomentin, sähköajoneuvot tarjoavat korkean vääntömomentin välittömästi. (Abidin, 2022). Sähkömoottorissa halutaan myös saavuttaa suuri tehotiheys moottorin tilavuuden pienentämiseksi ja korkea hyötysuhde pitkän kantaman saavuttamiseksi. Viimeaikaiset akku- ja hybridi sähköajoneuvot käyttävät pääasiassa kahta erilaista moottoria: induktiomootoreita ja kestopagneettitahtimoottoreita (eng. Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM). Vaikka PMSM moottorit ovat kalliita harvinaisten maametallien vuoksi, niistä on tullut suosituin valinta suuren tehotiheyden, vääntömomentin ja korkean hyötysuhteen ansiosta. Kestomagneettimoottoreita ilman harvinaisia maametalleja yritetään kehittää, mutta saman suorituskyvyn saavuttaminen on haastavaa. (Husain et al., 2021.) Suorakäyttötekniikkaan erikoistunut yritys Magnetic Innovations (n.d.) toteaa nettisivuillaan, että induktiomootoreiden hyötysuhde ja vääntömomentti on pienempi kestopagneettimoottoreihin verrattuna.

Kestomagneettimoottoreissa kestopagneetit voidaan sijoittaa roottorin sisäpuolelle (eng. Internal Permanent Magnet Motor, IPM) tai vaihtoehtoisesti ulkopinnalle (eng. Surface Permanent Magnet Motor, SPM). Vagatin (2010) tekemässä tutkimuksessa todetaan, että SPM moottoreita on helpompi valmistaa, sillä niillä on yksinkertaisempi rakenne. Korkeissa nopeuksissa SPM-moottorissa tapahtuu suuria kestopagneetti häviöitä (eng. PM-losses), kun taas IPM-moottorilla on erittäin hyvä ylikuormituksen sietokyky. Tämä tekee IPM-moottoreista paremman valinnan, sillä sähköajoneuvojen moottoreista pyritään tekemään mahdollisimman nopeita ja pieniä. (Vagati et al., 2010.)

Raskaiden ajoneuvojen suuri akku vie paljon ajoneuvon asennustilasta ja se lisää korkean hyötysuhteen tehoelektronikan kysyntää. Piikarbidiin (eng. Silicon Carbide, SiC) perustuvat komponentit tarjoavat merkittäviä parannuksia näihin tehoelektronikan sovelluksiin. Esimerkiksi SiC-pohjaisten vaihtosuuntaajien korkeampi hyötysuhde auttaa akun kapasiteetin tehokkaassa käytössä ja sitä kautta pidentää ajoneuvon kantamaa. Verrattuna tavanomaiseen piihin, SiC-komponentit tarjoavat paremman kytkentä- ja johtumistehokkuuden, joka vähentää vaihtosuuntaajissa aiheutuvia häviöitä. Suuremman tehotiheyden ansiosta SiC-pohjaiset vaihtosuuntaajat vaativat vähemmän asennustilaa. (Infineon, 2020.)

2.5 Tämänhetkisen kaluston vertailu

Taulukossa 2.5 vertaillaan tämänhetkisiä akku- ja vetypolttokeino reikkoja. Osa rekoista on edelleen testausvaiheessa, eikä niitä ole siksi otettu vielä laajamittaisesti käyttöön. Diesel reikkojen kantamassa on oletettu rekan kulutukseksi noin 30 litraa per 100 km.

Taulukko 2.5. Raskaan liikenteen kaluston vertailu

BET (Battery Electric Truck)					
Malli	Kantama	Teho	Akku	Lataus	Paino
Scania regional rigid truck	260 km	450 kW	624 kWh	+200 km per tunti	64 t GCWR
Mercedes-Benz eActros 600	500 km	400 kW	621 kWh	30 min (60 %)	44 t GCWR
Volvo VNR Electric 6x4 Tractor	~ 440 km	340 kW	565 kWh	90 min (80 %)	37,2 t GCWR
Tesla Semi	480–800 km	-	900 kWh	30 min (70 %)	37,2 t GCWR
Nikola TRE BEV	530 km	~ 480 kW	733 kWh	90 min (80 %)	37,2 t GCWR
Kenworth T680E	~ 240 km	~ 500 kW	396 kWh	3 tuntia (100 %)	Max 37,2 t GVWR
Peterbilt 579EV	~ 240 km	500 kW	400 kWh	3 tuntia (100 %)	37,2 t GCWR
Freightliner eCascadia	~ 370 km	350 kW	438 kWh	90 min (80 %)	37,2 t GCWR
FCET (Fuel Cell Electric Truck)					
Malli	Kantama	Teho	Akku	Vetysäiliö (H₂)	Paino
Hyundai XCIENT Fuel Cell Truck	400 km	350 kW	72 kWh	31 kg	38 t GCWR

Nikola TRE FCEV	~ 805 km	575 kW	164 kWh	70 kg	37,2 t GCWR
Mercedes-Benz GenH2	1000 km	660 kW	70 kWh	80 kg	36.3 t GCWR
Diesel					
Malli	Kantama	Teho	Polttoainetankki	Paino	
Mercedes-Benz Actros 2640 LS.	1330 km	394 hp (~ 290 kW)	400 litraa	40 t GCWR	
Ford F-MAXL	4500 km	368 kW	1350 litraa	44 t GCWR	
ISUZU FXZ 26-360 Freigh-ter	1330 km	265 kW	400 litraa	45 t GCWR	

Taulukosta 2.5 huomataan selkeitä eroja rekkojen välillä. Akkukäyttöisiä rekkoja on huomattavasti enemmän saatavilla kuin vetypolttokennollisia rekkoja, joka johtuu pidemmälle kehittyneestä infrastruktuurista. Taulukosta huomataan myös eroavaisuuksia kantamien ja akkujen välillä. Polttokennollisilla rekoilla on huomattavasti pienemmät akut, sillä suurin osa energiasta on säilöttynä vetysäiliöihin. Vetyrekkojen kantama lähentelee tietyissä malleissa 1000 km, kun taas akkukäyttöisissä rekoissa kantama on noin 500 km. Dieselrekkojen kantama on kumpaankin teknologiaan verrattuna huomattavasti korkeampi.

3 Pohdinnat

Akku- ja vetykäyttöiset raskaat ajoneuvot tarvitsevat tukia ja kannusteita etenkin teknologian käyttöönoton alkuvaiheessa. On hienoa nähdä, että Euroopassa on selkeä suunta ja tavoite nollapäästöteknologioiden käyttöönotossa liikenteessä. Ilmaston lämpeneminen ja ilman saastuminen ovat vakavia ongelmia ja raskaan liikenteen sähköistyminen tukisi varmasti näiden ongelmien päihittämistä. Mielestäni Euroopan suunta on hyvä, mutta aiheeseen tarvitaan lisää huomiota maailmanlaajuisella tasolla. Ilman tavoitteita ja tukia raskaan liikenteen sähköistäminen on kuitenkin mahdoton tehtävä.

Teknologia on kehittynyt nopeaa tahtia ja uskon kehityksen jatkuvan nopeana myös tulevaisuudessa, etenkin sähköisen raskaan liikenteen osalta. Uudet ja paremmat teknologiset ratkaisut kiihdyttävät liikenteen sähköistymistä ja tekevät nollapäästöteknologioista entistä kovempia kilpailijoita diesel polttomootoreihin verrattuna. Suurimpana huolenaiheena raskaan liikenteen sähköistymisessä on edelleen akkuteknologia ja sen riittävyys pitkillä matkoilla, sekä suuren akun aiheuttamat menetykset kuorman suhteen. Uskon näiden ongelmien väistyvän toimivan latausinfrastruktuurin ja kehittyvän akkuteknologian myötä. Tulevaisuus näyttää myös, tuleeko vaihtoehtoiset teknologiat kuten kaksisuuntainen lataus ja akunvaihtoteknologia edistämään raskaiden sähköisten ajoneuvojen käyttöönottoa.

Megawattiluokan latausinfrastruktuuri tulee tekemään raskaista sähköisistä ajoneuvoista entistä käytännöllisempiä, sillä latauksen kesto lyhenee huomattavasti. Tämä mahdollistaa nopean latauksen teiden varressa ja pidentää ajoneuvojen kantamaa. Megawattiluokan lataus ja lisääntyvät latausalueiden määrät aiheuttavat kuitenkin suuren kapasiteetin tarpeen sähköverkolle. Tämänhetkinen sähköverkon kapasiteetti ei kestä koko raskaan liikenteen sähköistymistä, sillä kuorma olisi aivan liian suuri. Ratkaisuna toimisi sähköisen raskaan liikenteen asteittainen käyttöönotto, joka antaisi lisää aikaa sähköverkon kapasiteetin suurentamiseen. Ensiksi sähköistettäisiin lyhyen matkan raskaat ajoneuvot ja sen jälkeen pitkän matkan raskaat ajoneuvot. Tulisi myös miettiä, onko 3,7MW:n lataus tarpeen ja olisiko 1 MW:n ja sitä alemmat tehot riittäviä toimivalle infrastruktuurille.

Tämänhetkinen akkuteknologia sopii mielestäni erityisen hyvin teollisuuden raskaille ajoneuvoille, jotka kulkevat usein päivästä toiseen samoja reittejä. Vetyteknologiaa voisi hyödyntää raskaassa liikenteessä vaihtoehtoisena vihreänä valintana akkuteknologian rinnalla. Vetyrekat olisivat käytännöllisempiä pitkillä matkoilla, sillä niiden kantama on akkukäyttöisiä rekkoja korkeampi ja tankkaaminen nopeampaa. Teknologian haasteina ovat muun kallis tankkausinfrastruktuuri sekä runsaasti energiaa vaativa vedyn elektrolyysi. Näen tulevaisuuden raskaan liikenteen koostuvan sekä vety-, että akkuteknologiasta, sillä molemmilla on omat hyvät ja huonot puolensa. Akkuteknologialla on muun muassa erinomainen hyötysuhde ja vedyllä hyvä energiatiheys.

4 Yhteenveto

Tutkimuksen tavoitteena oli käydä laajasti läpi raskaan liikenteen sähköistymisen tilanne monella eri osa-alueella. Tavoite saavutettiin ja aihetta tutkittiin muun muassa päästöta-voitteiden, tukipolitiikan ja erilaisten teknologioiden avulla.

Euroopan Unioni on asettanut ajoneuvoluokkakohtaisia päästöstandardeja, joilla pyritään edistämään nollapäästöteknologioiden käyttöönottoa liikenteessä sekä laajentamaan lataus-infrastruktuuria. Päästöstandardit sisältävät vuosittaisia päästövähennystavoitteita vuoteen 2040 asti. Pariisin ilmastopimuksen tavoitteet ohjaavat maailmanlaajuista siirtymää kohti nollapäästöteknologioita. Raskaan liikenteen sähköistyminen on ollut nousujohteista erityisesti Euroopassa ja raskaista ajoneuvoista sähköbussit ovat osoittautuneet kustannustehok-kaaksi vaihtoehdoksi. Sähkörekkojen markkinoita dominoi Kiina, mutta myös Euroopan ja Yhdysvaltojen myynnit ovat olleet nousussa. Pandemian ja geopoliittisten konfliktien vai-kutukset näkyvät markkinoissa, mutta myynti on lähtenyt takaisin nousuun vuonna 2022.

Akkukäyttöisten sähkörekkojen ennustetaan saavuttavan kokonaiskustannuspariteetti die-selrekkoihin vuoteen 2025 mennessä. Raskaan liikenteen sähköistymisen edistämiseksi tarvitaan taloudellisia kannustimia, kuten subventoituja lataus- ja polttoainekustannuksia. Vaikka latausinfrastruktuurin rahoittaminen on keskeistä, vaatii sen rakentaminen paljon aikaa. Vain 12 EU-maata tarjoaa tukea raskaan liikenteen latausinfrastruktuurille ja tukien määrässä ja laajuudessa on parannettavaa. Tuet painottuvat tällä hetkellä enemmän henki-löautojen sähköistämiseen kuin sähköisiin raskaisiin ajoneuvoihin. EU pyrkii edistämään raskaan liikenteen latausinfrastruktuurin rakentumista AFIR-asetuksen ja AFIF-rahoitusvälineen avulla, joiden tavoitteena on luoda raskaan liikenteen latausverkosto vuo-teen 2025 mennessä.

Akkuteknologia, latausteknologia, sähkömoottorit ja latauksen aiheuttama kuormitus säh-köverkkoon ovat keskeisiä aiheita liittyen raskaan liikenteen sähköistymisen teknologiaan. Vetyteknologiaa tarkastellaan vaihtoehtoisena teknologiana akkujen rinnalle. Akkukäyt-töisten sähkörekkojen etu on niiden energiatehokkuus ja suuri hyötysuhde, kun taas vety-polttokeho rekoilla niiden vähäinen menetys kuormassa ja vedyn suuri energiatiheys. Akut ja polttokennot toimivat eri tavalla ja niiden teknologiset edut eroavat toisistaan.

Akkujen kapasiteetin kasvattaminen raskaissa ajoneuvoissa on haastavaa tilan puutteen takia. Haasteita akkuteknologian suhteen ovat muun muassa kuorman hallinta, kriittisten mineraalien saatavuus ja hyötysuhteen säilyminen kylmällä säällä. Vaikka akkuteknologia tuottaa paljon haasteita, on litiumionikemien kehitys ollut merkittävää viime vuosina. Vetykäyttöiset raskaat ajoneuvot voidaan jakaa vetypoltto- ja vetypolttomootori-kuorma-autoihin. Vetypolttomootorit ovat tehokkaimpia suurella kuormituksella, kun taas vetypoltto-kuormat ovat tehokkaimpia pienemmällä kuormituksella. Vetypolttoaineen saatavuus ja infrastruktuuri ovat suurimpia teknologiaa rajoittavia tekijöitä.

Raskaan liikenteen sähköistyessä sähköverkon kapasiteetin tarve kasvaa hyvin suureksi ja päivittäinen kapasiteetin tarve voi nousta 110 GWh:iin päivässä. Vehicle-to-Grid (V2G) teknologian avulla voidaan kuitenkin sähköisistä raskaista ajoneuvoista tehdä kannattavampi vaihtoehto. Teknologia mahdollistaa energian palauttamisen takaisin sähköverkkoon ja ajoneuvon kuljettaja voi toimia energiakauppiaana. Tutkimus Kaliforniassa osoitti, että raskaat kuorma-autot voivat ansaita 7 000–12 000 dollaria vuodessa hyödyntämällä V2X-teknologiaa.

Jotta sähköisistä raskaista ajoneuvoista tulee kannattava vaihtoehto, tarvitaan tehokkaita ja nopeita latausmenetelmiä. Kaksi vartenotettavaa vaihtoehtoa ovat megawattiluokan lataus ja akunvaihtoteknologia. Megawattilatauksen standardi (SAE J3271), pyrkii tarjoamaan yli 400 kW:n latauskapasiteetin, joka ylettyy jopa 3,75 MW:iin asti. EU:n tavoitteena on luoda 40 000–50 000 suurtehoista latauspistettä ja 40 000 alle 100 kW:n laturia kuorma-autojen pysäköintialueille vuoteen 2030 mennessä. Latauspisteet keskittyvät pääasiassa Keski- ja Länsi-Euroopan alueelle (Saksa, Ranska, Yhdistynyt kuningaskunta).

Akunvaihtoteknologia tarjoaa joitakin etuja perinteiseen lataamiseen verrattuna, kuten nopean akunvaihtoprosessin sekä erilliset akun ja ajoneuvon elinkaaret. Kiinan hallitus on kannustanut akunvaihtoteknologiaa jo pitkään ja 49,5 % Kiinassa myydyistä sähkörekoista toimi akunvaihtoteknologialla vuonna 2022. Kiinan ulkopuolella akunvaihtoteknologiaa on kokeiltu vain vähän ja teknologian haasteena on standardoinnin puute sekä kalliit akunvaihtoasemat.

Sähkömoottorit tarjoavat jopa 80 %:n hyötysuhteen, kun taas polttomootorin hyötysuhde voi laskea jopa alle 15 %:iin. Raskaat sähköiset ajoneuvot käyttävät pääasiassa kestmagneettitahtimoottoreita ja induktiomoottoreita. Kestomagneettitahtimoottorit ovat näistä

kahdesta vaihtoehdosta suositumpia niiden korkean tehokkuuden ja vääntömomentin ansiosta. Moottorin haasteena ovat korkeat kustannukset ja harvinaiset maametallit. Induktiomootorit ovat halvempi vaihtoehto, mutta niillä on pienempi hyötysuhde ja vääntömomentti kestoplaneettimoottoriin verrattuna.

Lähteet

- Abidin, S. 2022. “What is torque, and why do electric cars produce so much of it?”. *Karfu*. Saatavilla: <https://karfu.com/knowledge/features/vehicles/what-is-torque-and-why-do-electric-cars-produce-so-much-it>
- ACEA 2021. “Interactive map – Truck charging points needed in Europe by 2025 and 2030, per country”. Saatavilla: <https://www.acea.auto/figure/interactive-map-truck-charging-points-needed-in-europe-by-2025-and-2030-per-country/>
- Adam Panayi. 2019. “Energy density and the challenges of electrification for heavy duty vehicles”. *Benchmarkminerals*. Saatavilla: <https://www.benchmarkminerals.com/blog-archive/energy-density-and-the-challenges-of-electrification-for-heavy-duty-vehicles/>
- Amending Council Directive 96/53/EC laying down for certain road vehicles circulating within the Community the maximum authorized dimensions in national and international traffic and the maximum authorized weights in international traffic 2023/0265/EU. Saatavilla: https://transport.ec.europa.eu/system/files/2023-07/COM_2023_445_0.pdf
- Amending Regulation (EU) 2019/1242 as regards strengthening the CO₂ emission performance standards for new heavy-duty vehicles and integrating reporting obligations, and repealing Regulation (EU) 2018/956. Saatavilla: https://climate.ec.europa.eu/system/files/2023-02/policy_transport_hdv_20230214_annexes_en_0.pdf
- Andrew, R. 2023. “EV manufacturer Nio opens 30th European battery swap station”. *Fleetnews*. Saatavilla: <https://www.fleetnews.co.uk/news/ev-manufacturer-nio-opens-30th-battery-swap-station-in-europe>
- Argonne 2023. “Charging For Heavy-Duty Electric Trucks, frequently asked questions about the Megawatt Charging System and SAE J3271”. Saatavilla: https://www.anl.gov/sites/www/files/2023-03/MCS_FAQs_Final_3-13-23.pdf
- Bassam, A., Iftekhhar, A., Daryoush, H., Asma, A. 2022. “Charging Challenges and Solutions for Commercial Electrical Vehicles”, *Smartgrid*, Saatavilla:

<https://smartgrid.ieee.org/bulletins/april-2022/charging-challenges-and-solutions-for-commercial-electric-vehicles>

ChargeSim 2021. "To Vehicle-2-Grid (V2G) or Not with Heavy Vehicle Fleets?" [Online].

Saatavilla: <https://www.chargesim.com/post/grow-your-blog-community>

Cunanan, C., Tran, M.-K., Lee, Y., Kwok, S., Leung, V., Fowler, M. "A Review of Heavy-Duty Vehicle Powertrain Technologies: Diesel Engine Vehicles, Battery Electric Vehicles, and Hydrogen Fuel Cell Electric Vehicles". *Clean Technol.* 2021, 3, 474-489. Saatavilla: <https://doi.org/10.3390/cleantechnol3020028>

Dr.-Ing. Karsten, B., Dr.-Ing Stefan, K., Dr.-Ing Marco, G. 2023. "Grid Readiness for HDV Charging". *T&E*. Saatavilla: https://www.transportenvironment.org/wp-content/uploads/2023/08/2023_07_TE_AFIR_grid_readiness_final.pdf

Energiavirasto 2023. "Tukea yli 500:lle sähköautojen suuritehoisille latauspisteille ja kahdelle vedyn tankkausasemalle". Saatavilla: <https://energiavirasto.fi/-/tukea-yli-500-lle-sahkoautojen-suuritehoiselle-latauspisteelle-ja-kahdelle-vedyn-tankkausasemalle>

Euroopan parlamentin ja neuvoston asetukset (EU) 2019/1242, annettu 20 päivänä kesäkuuta 2019, hiilidioksidipäästönormien asettamisesta uusille raskaille hyötyajoneuvoille ja Euroopan parlamentin ja neuvoston asetusten (EY) N:o 595/2009 ja (EU) 2018/956 sekä neuvoston direktiivin 96/53/EY muuttamisesta. Saatavilla: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/en/TXT/?uri=CELEX:32019R1242&qid=1687172796405>

European Commission 2023. "European Green Deal: Commission proposes 2030 zero-emissions target for new city buses and 90% emissions reductions for new trucks by 2040". Saatavilla: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_23_762

European Federation for Transport and Emission 2022. "How to buy an electric truck".

T&E. Saatavilla: <https://www.transportenvironment.org/wp-content/uploads/2022/11/TE-Briefing-2022-ZET-funding-FINAL.pdf>

Fröde, P., Noffsinger, J., Sahdev, S. 2023. "What promises does V2X hold for fleets?". *McKinsey & Company*. Saatavilla: <https://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/what-promise-does-v2x-hold-for-fleets>

- Hassan, Q., Azzawi, I.D.J., Sameen, A.Z., Salman, H.M. (2023). “Hydrogen Fuel Cell Vehicles: Opportunities and Challenges”. *Sustainability*, 15, 11501. Saatavilla: <https://doi.org/10.3390/su151511501>
- Hongyang, C., Yihao, X., Tianlin, N. 2023. “China is propelling its electric truck market by embracing battery swapping”. *ICCT*. Saatavilla: <https://theicct.org/china-is-propelling-its-electric-truck-market-aug23/>
- Husain, I., Ozpineci, B., Islam, M, Sariful., Gurpinar, E., Su, G., Yu, W., Chowdhury, S., Xue, L., Rahman, D., and Sahu, R. 2021. “Electric Drive Technology Trends, Challenges, and Opportunities for Future Electric Vehicles”. *United States: N. Web*. Saatavilla: <https://www.osti.gov/servlets/purl/1763457>
- Infineon 2020. “Advantages and challenges in using electric motors and silicon carbide power semiconductors in the commercial vehicle industry”. Saatavilla: https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-Advantages_and_challenges_in_using_electric_motors_and_silicon_carbide_power_semiconductors_in_the_commercial_vehicle_industry-Article-v01_00-EN.pdf?fileId=5546d4627617cd83017622f764ef7aa6
- International Council on Clean Transportation 2022. “Electrification of heavy-duty vehicles in emerging markets”. *ICCT*. Saatavilla: <https://theicct.org/wp-content/uploads/2022/09/global-hvs-evs-zev-electrif-hdv-emerg-mkts-sep22.pdf>
- International Energy Agency 2022. “Global EV Outlook 2022”. *IEA*. Saatavilla: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/ad8fb04c-4f75-42fc-973a-6e54c8a4449a/GlobalElectricVehicleOutlook2022.pdf>
- International Energy Agency 2023. “Trends in electric heavy-duty vehicles”. *IEA*. Saatavilla: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2023/trends-in-electric-heavy-duty-vehicles>
- Isabelle Dumé. 2023. “Lithium-ion batteries break energy density record.” *Physicsworld*. Saatavilla: <https://physicsworld.com/a/lithium-ion-batteries-break-energy-density-record/>

- Jean, B., Romain, D., Greg de, T., Thomas, B. 2022. “Decarbonizing heavy-duty road transport in Europe”. *Kearney*. Saatavilla: <https://www.kearney.com/industry/energy/article/decarbonizing-heavy-duty-road-transport-in-europe>
- MagneticInnovations (n.d.). “What is the difference between ac/dc motors?”. Saatavilla: <https://www.magneticinnovations.com/faq/what-is-the-difference-between-ac-dc-motors/>
- Marie, R, B., Alexander, T., Hongyang, C., Pierre-Louis, R. 2022. “Charging solutions for battery-electric trucks”. *ICCT*. Saatavilla: <https://theicct.org/wp-content/uploads/2022/12/charging-infrastructure-trucks-zeva-dec22.pdf>
- Mårtensson, L. 2022. “7 Common myths about electric truck batteries”. *Volvo*. Saatavilla: <https://www.volvotrucks.com/en-en/news-stories/insights/articles/2022/sep/7-common-myths-about-an-electric-truck-batteries.html>
- Nebergall, J. 2023a. “Can an engine run on hydrogen?”. *Cummins*. Saatavilla: <https://www.cummins.com/news/2023/06/09/can-engine-run-hydrogen>
- Nebergall, J. 2023b. “Hydrogen internal combustion engines and hydrogen fuel cells”. *Cummins*. Saatavilla: <https://www.cummins.com/news/2022/01/27/hydrogen-internal-combustion-engines-and-hydrogen-fuel-cells>
- OrangeEV 2023. “Why LFP battery chemistry is superior for electric yard trucks”. Saatavilla: <https://orangeev.com/industry-news/lfp-battery-chemistry-is-superior/>
- Pardhi, S., Chakraborty, S., Tran, D., Baghdadi, M.E., Wilkins, S., Hegazy, O. 2023. ”Fuel Cell Heavy-Duty Vehicle”. *Encyclopedia*. Saatavilla: <https://encyclopedia.pub/entry/39807>
- Senza (n.d.). “The Future of Energy Storage: Hydrogen VS Lithium”. Saatavilla: <https://senzahydrogen.com/hydrogen-vs-lithium.html>
- Thomas, K, W. 2023. “Zero Emission Long-Haul Heavy-Duty Trucking”. *CATF*. Saatavilla: <https://cdn.catf.us/wp-content/uploads/2023/03/13145547/zero-emission-long-haul-heavy-duty-trucking-report.pdf>

- Transport & Environment 2021. “Why the future of long-haul trucking is electric”. *T&E*. Saatavilla: <https://www.transportenvironment.org/discover/why-the-future-of-long-haul-trucking-is-electric/>
- Transport & Environment 2023. “Fully charged for 2030”. *T&E*. Saatavilla: <https://www.transportenvironment.org/discover/fully-charged-for-2030/>
- TransportPolicy 2019. “EU: Heavy-Duty: GHG Emissions”. Saatavilla: <https://www.transportpolicy.net/standard/eu-heavy-duty-ghg-emissions/>
- U.S. Department of Energy 2012. “Vehicle Weight Classes & Categories”. Saatavilla: <https://afdc.energy.gov/data/10380>
- Vagati, A., Pellegrino, G., Guglielmi, P. "Comparison between SPM and IPM motor drives for EV application," *The XIX International Conference on Electrical Machines - ICEM 2010*. Saatavilla: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/5607911>
- Ventoniemi, J., Vornfeld, M. 2023. “Switching to Electric: What to know about electric truck charging”. *Kempower*. Saatavilla: <https://kempower.com/electric-truck-charging-what-to-know/>
- VTI 2023. “New project investigates battery swapping for heavy duty vehicles”. Saatavilla: <https://www.vti.se/en/archives/news/archives/2023-04-17-new-project-investigates-battery-swapping-for-heavy-duty-vehicles>
- Wasim, S., Sonia, Y., Frances, S., Patrick, P., Daniel, S. “Battery electric long-haul trucks in Europe: Public charging, energy, and power requirements”, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Volume 121, 2023, 103825, ISSN 1361-9209, Saatavilla: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2023.103825>
- Wróbel, K., Wróbel, J., Tokarz, W., Lach, J., Podsadni, K., Czerwiński, A. 2022. “Hydrogen Internal Combustion Engine Vehicles: A Review”. *Energies*, 15, 8937. <https://doi.org/10.3390/en15238937>
- ZEV Transition Council 2022. “Deploying charging infrastructure to support an accelerated transition to zero-emission vehicles”. *ZEVTC*. Saatavilla: <https://theicct.org/wp-content/uploads/2022/09/Charging-Infrastructure-ZEVTC-final.pdf>

Kaluston vertailu:

Ford. *F-MAXL*. Saatavilla: https://fordtrucksglobal.com/uploads/page/1.fmaxL_specboard-2022-1.pdf

Freightliner. *eCascadia*. Saatavilla: <https://www.freightliner.com/trucks/ecascadia/>

Hyundai. *XCIENT Fuel Cell Truck*. Saatavilla: <https://ecv.hyundai.com/global/en/products/xcient-fuel-cell-truck-fcev/>

ISUZU. *FXZ 26-360 Freighter*. Saatavilla: https://www.eaglecanyonauto.co.za/images/Vehicle/FX-Series_Trucks/Facelift/ISUZU_FXZ_26-360_FREIGHTER_AUTO_specification_180822.pdf

Iulian, D. 2023. “Mercedes-Benz eActros 600 Truck Unveiled With Massive LFP Battery”. *InsideEVs*. Saatavilla: <https://insideevs.com/news/691149/mercedes-eactros-truck-reveal-range-battery-specs/>

Kenworth. *T680E*. Saatavilla: <https://www.kenworth.com/trucks/t680e/>

Mark, K. 2020. “Daimler Presents GenH2 Truck Fuel-Cell Concept Truck”. *InsideEVs*. Saatavilla: <https://insideevs.com/news/444480/mercedes-genh2-truck-fuel-cell-concept-truck/>

Mercedes-Benz. *eActros 600*. Saatavilla: https://www.mercedes-benz-trucks.com/en_ID/models/long-distance-actros/technical-data/specification-dimension.html

Nikola. *TRE BEV*. Saatavilla: <https://www.nikolamotor.com/the-nikola-tre-bev-reinventing-short-haul-transportation/>

Nikola. *TRE FCEV*. Saatavilla: <https://www.nikolamotor.com/tre-fcev/>

Scania. *Regional rigid truck*. Saatavilla: <https://www.scania.com/group/en/home/products-and-services/trucks/battery-electric-truck.html>

Tesla. *Semi*. Saatavilla: <https://www.tesla.com/semi>

Volvo. *VNR Electric 6x4 Tractor*. Saatavilla: <https://www.volvotrucks.us/trucks/vnr-electric/specifications/>