

Raskaan sähköisen liikenteen tilanne ja tulevaisuus

SIX HOVE innovaatioklusterin ja tutkimuksen loppuraportti



Tampereen yliopisto, Liikenteen tutkimuskeskus Verne:

Heikki Liimatainen

Erika Kallionpää

Mehdi Jahangir Samet

Sheba Nair

Sepideh Salehi Bargezar

Pekka Heininen

Tiivistelmä

Suomen tavoite on olla hiilineutraali yhteiskunta vuoteen 2035 mennessä ja tähän tavoitteeseen pääsemisen on fossiilittoman liikenteen tiekartassa nähty edellyttävän liikenteen päästöjen puolittamista 2030 mennessä ja poistamista kokonaan 2045 mennessä. Tieliikenteen päästöistä noin kolmannes aiheutuu kuorma-autoista ja kuorma-autojen päästöjen ennakoidaan perusennusteessa pienenevän vain 25 % vuoteen 2030 mennessä ja 31 % vuoteen 2045 mennessä, joten uusia toimenpiteitä kuorma-autojen päästöjen vähentämiseksi tarvitaan nopeasti.

Tutkimuksen tavoitteena on tuottaa valikoima suosituksia kuorma-autojen sähköistämisen edistämiseksi Suomessa. Hanke vertailee eri toteutusvaihtoehtojen elinkaaripäästöjä ja -taloutta kuljetus-, sähköverkko- ja energiayhtiöiden sekä yhteiskunnan kannalta.

Tulosten mukaan noin 70 % sähkökuorma-autojen tarvitsemasta sähköstä Suomessa voidaan toimittaa terminaalilatauspisteiden kautta, jolloin kuorma-autot voidaan ladata täyteen ennen matkan aloittamista. Loput 30 % energiantarpeesta katetaan latauksella pakollisten pitkien taukojen aikana, suurteholatauksella lyhyiden taukojen aikana ja mahdollisella latauksella lastauksen tai purkamisen aikana.

Backcasting-analyysin tulokset osoittavat, että elinkaarenaikaisten kasvihuonekaasupäästöjen vähentäminen noin 94 %:lla on mahdollista. Tulokset osoittavat, että kaupunkijakelussa sähkökuorma-autot voivat nykyisellä akkuteknologialla olla taloudellisesti kannattavia vaihtoehtoja dieselkuorma-autoille ilman politiikkatoimien apua. Kuitenkin pitkämatkaisissa kuljetuksissa ankarissa sääolosuhteissa sähkökuorma-auto on edelleen haastava ja saattaa olla taloudellisesti mahdoton edes megawatin lataustehon avulla, mikä nostaa esiin tarpeen mahdollisille politiikkatoimille, kuten hankintatuille ja latausinfrastruktuurin investointituille.

Kuorma-autoliikenteen kokonaiskustannukset laskevat nopean sähköistymisen Sähkö-skenaariossa koko laskenta-ajan verrattuna BAU-skenaarioon, jossa päästötavoitteita ei saavuteta, ja erityisesti verrattuna Bio-skenaarioon, jossa uusiutuvaa dieseliä tarvitaan suuri osuus, jotta päästötavoitteisiin päästään. Sähkö-skenaariossa kustannustehokkuus on -199 €/t. Bio-skenaariossa vastaavasti kustannustehokkuus on 172 €/t. Yhteiskuntataloudellista näkökulmasta sähkökuorma-autojen edistäminen on siis erittäin kannattavaa, vaikka hankintahinta olisi 2,5-kertainen diesel-kuorma-autoon nähden. Kannattavuutta parantaa edelleen sähkökuorma-autojen hankintahintojen todennäköinen aleneminen.

Sisällysluettelo

Tiivistelmä	2
1. Raskaan sähköisen liikenteen tarve	4
2. Innovaatioklusterin ja tutkimuksen sisältö	6
2.1 Innovaatioklusteri	6
2.2 Teollisen tutkimuksen kokonaisuus	6
2.3 Tiekuljetusten ja kuorma-autojen sähköistyksen mallinnus ja elinkaarianalyysit	8
3. Raskaan sähköisen liikenteen tilannekuva	13
3.1 Sähkökuorma-autojen markkinatilanne	13
3.2 Akunvaihtojärjestelmät	13
4. Sähkökuorma-autojen toimintaedellytykset	17
4.1 Tiekuljetusten tilanne Suomessa	17
4.2 Käyttöprofiileja palveleva latausinfrastruktura	19
4.3 Kuorma-autojen ja logistiikkakeskusten käyttöprofiilien asettamat mahdollisuudet ja haasteet	23
5. Kuorma-autokannan sähköistyksen vaikutukset	25
5.1 Elinkaaripäästöt	25
5.2 Elinkaarikustannukset	26
5.3 Yhteiskuntataloudellinen kustannustehokkuus	29
6. Raskaan sähköisen liikenteen tiekartta	34
Lähteet	35
Liite 1 Hankkeen perustiedot	41

1. Raskaan sähköisen liikenteen tarve

Suomen tavoite on olla hiilineutraali yhteiskunta vuoteen 2035 mennessä ja tähän tavoitteeseen pääsemisen on fossiilittoman liikenteen tiekartassa nähty edellyttävän liikenteen päästöjen puolittamista 2030 mennessä ja poistamista kokonaan 2045 mennessä. Tieliikenteen päästöistä noin kolmannes aiheutuu kuorma-autoista ja kuorma-autojen päästöjen ennakoidaan perusennusteessa pienenevän vain 25 % vuoteen 2030 mennessä ja 31 % vuoteen 2045 mennessä, joten uusia toimenpiteitä kuorma-autojen päästöjen vähentämiseksi tarvitaan nopeasti. Valtioneuvoston periaatepäätös nostaa toimenpiteeksi kuitenkin vain hankintatuen sähkökuorma-autoille ja Suomessa sallittujen suurten kuorma-autojen täysimääräisen hyödyntämisen, joiden päästövähennykseksi on arvioitu vain 3,7 % kuorma-autojen päästöistä vuoteen 2030 mennessä. Lisäksi logistiikan digitalisaatiolla ja yhdistetyillä kuljetuksilla voidaan saada päästövähennyksiä, joiden suuruus on kuitenkin epävarma. Näin ollen kuljetusten päästöjen vähentämiseksi on suuri tarve löytää uusia toimenpiteitä ja analysoida niiden kustannuksia ja päästövaikutuksia. Hanke on siten erittäin tärkeä yhteiskunnallisesti.

Kuorma-autojen sähköistyksen vaihtoehtoiset teknologiat kehittyvät nopeasti ja ne mullistavat nykyisen kuljetuspalvelu-, ajoneuvo- ja käyttövoimaekosysteemin. Suurimmat kuorma-autovalmistajat ovat joulukuussa 2020 eurooppalaisen autovalmistajien järjestön ACEA:n piirissä sopineet myyvänsä vain fossiilittomia kuorma-autoja vuoteen 2040 mennessä. Suomalaiset yritykset ovat kansainvälisesti erittäin arvostettuja sähköautojen latausinfrastruktuurin kehittämisessä. Pääpaino latausinfrastruktuurissa on ollut henkilöautoissa ja kuorma-autojen vaatimat erittäin suuritehoiset latausratkaisut ovat vielä kansainvälisesti kehitysvaiheessa. Suomalaisilla yrityksillä on erinomaiset mahdollisuudet kasvaa alalla merkittäviksi toimijoiksi ja suomalaisten kuorma-autojen sähköistäminen ja siihen liittyvä infrastruktuuri avaavat suomalaisille yrityksille erinomaiset mahdollisuudet saada referenssejä vientiin. Hankkeessa tuotettavan TKI- ja markkinatiekartan toimeenpano avaisi siten suomalaiselle teknologiateollisuudelle erinomaiset kansainvälisen kasvun mahdollisuudet. Samalla on keskeistä varmistaa, että suomalaiset kuorma-autojen loppukäyttäjät pystyvät tekemään siirtymän nollapäästöisiin käyttövoimiin hallitusti ja punnitun tiedon pohjalta. SIX HOVE -hankkeen kautta käynnistetään sähköisen raskaan liikenteen innovaatioklusterin muodostuminen teknologiatoimittajien ja loppukäyttäjien yhteistyöverkostona, muodostetaan raskaan liikenteen sähköistyksen ja nollapäästöisyyden strateginen tiekartta, sekä tuotetaan tutkimuksen kautta tietoa ja syötteitä käynnistyvän prosessin tukemiseksi ja vauhdittamiseksi.

Viime vuosien akku-, lataus- ja vetypolttokennoteknologian kehitys on tuonut uusia mahdollisuuksia myös kuorma-autojen sähköistykseen. Sähköistykseen on siten olemassa useita teknologisia vaihtoehtoja, joiden vaikutukset kuorma-autojen operointiin ja energiaverkkoihin ovat hyvin erilaiset ja kaikilla teknologioilla erittäin

merkittävät. Näin ollen tarvitaan laajaa ymmärrystä teknologiavaihtoehtojen ominaisuuksista ja tarpeista sekä vaikutuksista kuljetuspalvelu-, ajoneuvo- ja käyttövoimaekosysteemin toimijoihin. Samaan aikaan kuljetuksen ja logistiikan laaja toimijakenttä on vasta aktivoitumassa odotetun sähköisen kaluston ja ratkaisuiden markkinatarjonnan kautta. Luotettavan ja punnitun tiedon ja todellisten käyttökokemusten tarve on suuri hankintojen ja liiketoiminnan riskien hallitsemiseksi. Ekosysteemin ja innovaatioklusterin rakentaminen tähtää tähän ja hanke kokonaisuutena tuottaa kaikille osapuolille tarvittavaa ymmärrystä.

Suomessa on paljon hyviä kansallisen tason pistemäisiä strategioita, ohjelmia ja tiekarttoja. Konkreettisenä esimerkkinä fossiilittoman liikenteen tiekartta ja Euroopan Fit for 55, joiden tavoitteet ovat äärimmäisen kunnianhimoisia. Toimien toteutus ja vaikuttavuus syntyy jalkauttamalla sisältöjä teollisuuden ja loppukäyttäjien liiketoimintaan ja tuotteisiin. Samalla parannetaan osaltaan myös toimintaympäristömme pitkän aikajänteen ennakoitavuutta.

Nollapäästöisen tieliikenteen käyttövoimiin liittyvä ekosysteemityö on Suomessa jäsentymätöntä ja ekosysteemien välisessä yhteistyössä piilee suuri hyödyntämätön potentiaali. SIX HOVE -innovaatioklusterin muodostamisessa tavoittelemme aktiivisesti yhteen toimivaa verkostoa monikanavaisen (Traficom, BF, Horizon Europe, yksityiset hankkeet) yhteistyön kautta sen sijaan että jokainen edistää asioita erillisissä hankkeissa. Tämä on erityisen tärkeää, kun raskaan tieliikenteen sähköistys on vasta alkutekijöissään.

Suomalaiset toimijat yksissään ovat maailmalla pieniä, mutta klustereissa muodostavat merkittävän voiman. Yhdessä pystymme vaikuttamaan esim. EU strategioihin, hakujen sisältöihin ja standardointialoitteisiin. Klusterin toimijoiden tiekartoilla on yhteneviä sisältöjä esimerkiksi digitalisaatioon ja sähköistymiseen liittyen. Tavoitteena on tehdä raskas ja aikaa vievä tutkimustyö yhdessä ja muodostaa tulokoreja, joiden sisältöä eri toimijat voivat hyödyntää omiin käyttötarkoituksiinsa.

Osaajien hyvä saatavuus on teollisuuden ja toimijoiden hyvinvoinnin kannalta keskeisen tärkeää. Vaikutetaan yhdessä alan kiinnostavuuteen ja koulutukseen osaajien saatavuuden turvaamiseksi myös tulevaisuudessa.

Projektin keskeisenä tavoitteena on käynnistää sähköisen raskaan liikenteen SIX HOVE -innovaatioklusterin muodostaminen ja toiminta alkuvaiheen toimijajoukolla. Projektin tavoitteena on projektin aikana lisäksi kasvattaa aktiivista toimijaryhmää siten, että varmistetaan tarvittavien käyttäjäryhmien, toimijoiden ja sidosryhmien riittävä edustus kokonaisuudessa.

2. Innovaatioklusterin ja tutkimuksen sisältö

2.1 Innovaatioklusteri

SIX HOVE -innovaatioklusterin muodostaminen ja käynnistäminen julkisen ja yksityisen sektorin yhteiskehittämisen kanssa nojaa seuraaviin tavoitteisiin ja toiminnan kulmakiviin:

1. Yhteisten päämäärien ja tavoitteiden määrittely ja selkeyttäminen
2. Yhteisten kehityskohteiden ja konkreettisten toimenpiteiden asettaminen (markkinatiekartta)
3. Toimijat ja organisoituminen
4. Yhteisten toimintamallien sopiminen ja tarvittavat mahdollistajat konkreettisten yhteisten toimenpiteiden tekemiseen

Näiden tavoitteiden saavuttamisesta ja konkreettisesta raportoinnista syntyvät Klusteri-osuuden odotetut tulokset. Osapuolten on työn edetessä mahdollista myös nostaa uusia painotuksia esiin, esimerkiksi osaamiseen ja sen kehittämiseen liittyvät haasteet ja niiden hallinta käyttövoimamurroksessa. Edellä esitettyjen hallinnollisten ja yhteiskehittämisen toimintamallin luomiseen tähtäävien osuuksien lisäksi SIX HOVE on maantieliikenteen operatiivisen toiminnan, käytötapausten ja toimijakentän ratkaisu- ja palveluntarjoajien kannalta jaettu neljään fokusalueeseen:

- A. Kaupunkien kaupallinen ja hyötyliikenne (kaupunkikuljetukset, jätehuolto)
- B. Raskaan kaluston alueelliset ja pitkän matkan kuljetukset
- C. Teollisuuden kuljetukset
- D. Käyttötarkoitusta palveleva latausinfrastruktuuri

Kuhunkin fokusalueeseen liittyy jo klusterin perustamisvaiheessa VTT:n ja TAU:n lisäksi aihepiiriin avaintoimijoita (case-yritykset ja alueelliset innovaatiotoimijat). Case-yritysten toivottu rooli on olla suunnannäyttäjä strategian toteutuksessa ja tuoda esikilpailullisen tason käyttökokemuksia ja dataa hyödynnettäväksi muualla klusterissa. SIX HOVE -kokonaisuuden painopiste tulee alkuvaiheessa olemaan loppukäyttäjien, operaattorien ja kuljetuspalveluiden tilaajien riittävän laaja osallistaminen innovaatioklusterin toimintaan (kysyntä). Ratkaisujen eli tarjonnan osalta, SIX-klusterissa on monia teknologia- ja palvelusektorin toimijoita, jotka sijoittuvat vientiteollisuuden ryhmään ja alueellisten innovaatiotoimijoiden kautta klusterilla on kontakti hyvin laajaan joukkoon yrityksiä. Tästä toimijaryhmästä olevia yrityksiä osallistetaan täysimääräisesti SIX HOVE -kokonaisuuteen

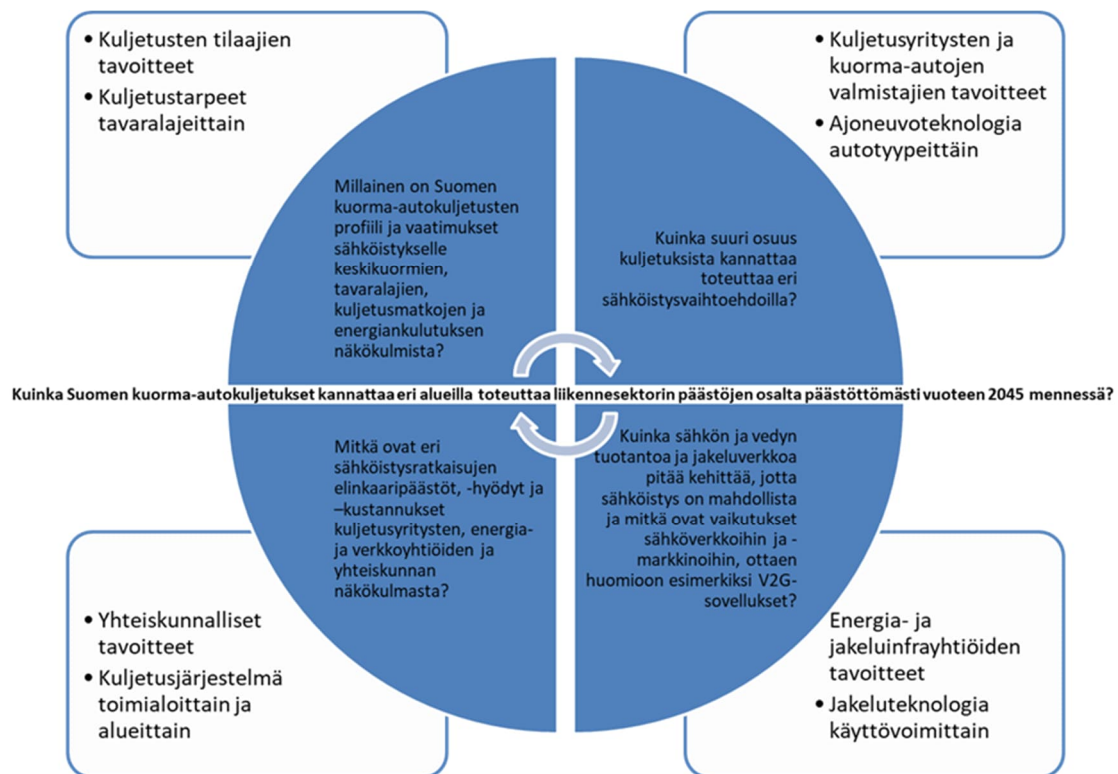
2.2 Teollisen tutkimuksen kokonaisuus

Teollisen tutkimuksen hankekokonaisuuden tavoitteena on tuottaa valikoima suosituksia kuorma-autojen sähköistämisen edistämisestä Suomessa. Tutkimukseen sisältyy myös

keskeisiä toteutettavuustutkimuksen elementtejä huomioitaessa eri käyttötapaukset ja niiden vaatimukset, operoinnin reunaehdot ja teknoekonomia. Kuorma-autojen sähköistys voi tapahtua akkujen suurteholatauksen, akkujen vaihdon, johdinsähkön tai vetypolttokennon avulla tai näiden yhdistelmällä. Hanke vertailee eri toteutusvaihtoehtojen elinkaaripäästöjä ja -taloutta kuljetus-, sähköverkko- ja energiayhtiöiden sekä yhteiskunnan kannalta.

Tutkimushankkeen lopputuloksena tuotetaan tiekartta kuorma-autojen sähköistämisen edistämisestä Suomessa elinkaaripäästöjen ja -kustannusten kannalta parhaalla tavalla, ottaen huomioon kuljetusyritysten, sähköverkkoyhtiöiden, energiayhtiöiden ja yhteiskunnan näkökulmat. Suosituksen lähtökohtana on liikenteen kasvihuonekaasupäästöjen vähentämistavoitteen mukaisesti vähentää kuorma-autojen päästöt puoleen vuoden 2005 tasosta vuoteen 2030 mennessä ja poistaa päästöt kokonaan vuoteen 2045 mennessä.

Tarkasteltavat sähköistämisen vaihtoehdot ovat sähkökuorma-autot akkujen suurteholatauksella, akkujen vaihtojärjestelmällä tai johdinsähköratkaisuilla sekä täydentävinä ratkaisuinä vetypolttokennokuorma-autot, näiden mahdolliset yhdistelmät ja näihin liittyvä jakeluinfrastruktuuri. Kunkin teknologiavaihtoehdon osalta tarkastellaan elinkaaripäästöjä ja -taloutta, sisältäen ajoneuvojen valmistuksen päästöt, hankinnan, käytön, huollon ja käytöstä poiston, sekä vedyn jakeluinfrastruktuurin ja sähköverkon ja latausratkaisujen kehittämisen elinkaaritalous ja -päästöt.



Kuva 1. Hankkeen tutkimusteemat

Päätutkimuskysymys on: Kuinka Suomen kuorma-autokuljetukset kannattaa eri alueilla toteuttaa liikennesektorin päästöjen osalta päästöttömästi vuoteen 2045 mennessä?

Päätutkimuskysymykseen vastataan seuraavien alatutkimuskysymyksien avulla:

1. Millainen on Suomen kuorma-autokuljetusten profiili ja vaatimukset sähköistykselle keskikuormien, tavaralajien, kuljetusmatkojen ja energiankulutuksen näkökulmista?
2. Kuinka suuri osuus kuljetuksista kannattaa toteuttaa eri sähköistysvaihtoehdoilla?
3. Miten raskaan liikenteen sähköistuksen avainteknologioiden (akut, lataus) voidaan odottaa kehittyvän ja mikä vaikutus tällä on sähköistuksen toteutettavuuteen?
4. Kuinka julkista AFIR-infrastruktuuria ja yksityistä latausverkostoa pitää kehittää, jotta sähköistys on mahdollista ja mitkä ovat vaikutukset sähköverkkoihin ja -markkinoihin, ottaen huomioon esimerkiksi V2G-sovellukset?
5. Mitkä ovat eri sähköistysratkaisujen elinkaaripäästöt, -hyödyt ja -kustannukset kuljetusyritysten, energia- ja verkkoyhtiöiden ja yhteiskunnan näkökulmasta?

2.3 Tiekuljetusten ja kuorma-autojen sähköistuksen mallinnus ja elinkaarianalyysit

Mallinnuksen ja elinkaarianalyysin pohjaksi tutkittiin eurooppalaisia maantie- ja tavaraliikennemalleja, jotta voitiin arvioida, miten sähkökuorma-autoja voidaan arvioida osana skenaariokokonaisuutta, joka tukee Suomen ilmastotavoitteita liikenteen päästöjen puolittamisesta vuoteen 2030 mennessä ja niiden poistamisesta vuoteen 2045 mennessä. Kirjallisuustutkimus osoitti, että tavaraliikenteen malleja tarvitaan kuljetuskysynnän, toimitusketjujen, teknologiavaihtoehtojen ja energiamuotojen yhdistämiseksi, jotta voidaan ohjata politiikkaa ja investointeja päästöttömään tavaraliikennejärjestelmään.

Tutkimuksessa tehtiin systemaattinen kirjallisuuskatsaus, jossa tunnistettiin 52 artikkelia ja valittiin 15 yksityiskohtaiseen analyysiin. Katsauksessa tarkasteltiin, mitä malleja on olemassa, miten ne on suunniteltu, mihin niitä käytetään ja miten sähkökuorma-autot voitaisiin integroida malleihin.

Tutkimuksessa tutkittiin useita tärkeitä kansallisia ja EU:n malleja. Norjan kansallinen tavaraliikennemalli on strateginen verkostomalli, joka optimoi lähetysten koon, kuljetusketjut ja terminaalien käytön. Itävallan VMÖ soveltaa Aggregated/Disaggregated/Aggregated (ADA) -rakennetta tuottaakseen lähtöpaikka-

määränpäämatriisit ja suorituskyyindikaattorit. Norjan stock-flow autokantamalli (BIG) arvioi käyttövoimittaista kantaa, suoritteita, energiankulutusta ja päästöjä. EU:n tasolla TRANS-TOOLSin ja HIGH-TOOLin kaltaisia malleja käytetään pääasiassa politiikkatoimien ja skenaarioiden analysointiin. Nämä esimerkit osoittavat, miten tavaraliikennemallit voivat yhdistää hyödykevirrat kuljetusketjuihin, ja osoittaa erilaisten poliittisten valintojen vaikutukset.

Tavaraliikennemalleja käytetään politiikan arviointiin, infrastruktuurin suunnitteluun, hyödykevirtojen analysointiin, tulevien kaluston tarpeiden arviointiin, ruuhkien hallintaan ja multimodaalisten strategioiden tukemiseen. Tällaiset mallit antavat ohjeita kansallisille päätöksille siitä, mihin ja milloin infrastruktuuriin investoidaan ja miten puhtaampiin teknologioihin siirtymistä hallitaan.

Kirjallisuudessa osoitettiin, että akkukäyttöisten sähkö- ja vetykuorma-autojen käyttö voi vähentää merkittävästi kasvihuonekaasupäästöjä, mutta lopputulos riippuu tukitoimista, kuten CO₂-hinnoittelusta, teknologiakustannusten laskusta sekä riittävistä lataus- ja tankkausverkostoista. Keskeiset haasteet liittyivät akkujen kustannuksiin, energiatihyteen ja käyttöikään sekä vetypuolella polttokennojen kustannuksiin, vetysäiliöiden tilavuuteen ja vedyn hintaan. Katsauksessa havaittiin myös, että malleissa on tärkeää ottaa huomioon energiajärjestelmien vuorovaikutukset, kuten sähkön ja vedyn tuotanto.

Vain harvoissa tutkimuksissa sähkökuorma-autot sisällytetään malleihin riittävän yksityiskohtaisesti todellisten suunnitteluolosuhteiden kuvaamiseksi. Latausaikojen, hyötykuormakapasiteettiin kohdistuvien vaikutusten ja latausinfrastruktuurin sijainnin kaltaisia tekijöitä otetaan huomioon harvoin. Ilman näitä yksityiskohtia on vaikea kehittää luotettavia skenaarioita siitä, miten tavaraliikenteen hiilidioksidipäästöjen vähentäminen voisi edetä.

Suomen osalta katsauksen pohjalta voidaan suositella rakentamaan kansainvälisiä käytäntöjä ja luomaan kansallinen tavaraliikennemalli, jossa yhdistyvät kysynnän ennustaminen ja kuljetusketjujen muodostaminen teknologiavaihtoehtoja ja energiainfrastruktuuria käsitteleviin komponentteihin. Tällainen malli mahdollistaisi päästöjen, kustannusten ja erilaisten teknologian käyttöönottoskenaarioiden tarkemman arvioinnin.

Kasvihuonekaasupäästöjen elinkaarianalyysi (LCA) voi olla hyödyllinen seuraavista syistä: 1) se on kattava ympäristöarviointi, 2) se mahdollistaa päästöjen hotspottien tunnistamisen, 3) se voidaan toteuttaa erilaisille vaihtoehtoisille voimansiirtotekniikoille ja polttoaineille, 4) se ohjaa politiikkaa ja investointeja ja 5) sitä voidaan käyttää alueelliseen ja skenaarioherkkyysanalyysiin. Elinkaariarviointi voitaisiin toteuttaa seuraavilla lähestymistavoilla: prosessipohjainen elinkaariarviointi (Baral et al., 2021; Burul & Algesten, 2021; D. Y. Lee & Thomas, 2017; Sen et al., 2017; Y. Zhao, Onat et al.,

2016; Y. Zhao & Tatari, 2017; Zhou et al., 2017), taloudellisiin panoksiin ja tuotoksiin perustuva elinkaariarviointi (D. Y. Lee et al., 2013) ja hybridielinkaariarviointi (Sen et al., 2019; Y. Zhao, Ercan et al., 2016). Elinkaariarvioinnin prosessipohjainen lähestymistapa voisi olla paras vaihtoehto BET:n elinkaaren aikaiseen kasvihuonekaasuanalyysiin, jotta voidaan tunnistaa keskeiset osatekijät hiilidioksidipäästöjen vähentämistavoitteiden saavuttamiseksi (Hill et al., 2020; Wolff et al., 2020).

Sähkön kasvihuonekaasuintensiteetillä voi olla ratkaiseva rooli elinkaariarvioinnin eri vaiheissa, esimerkiksi kuorma-autojen valmistuksessa tai lataustoiminnoissa. Useat tutkimukset (Burul & Algsten, 2021; D. Y. Lee et al., 2013; D. Y. Lee & Thomas, 2017; Sen et al., 2017; Y. Zhao, Onat et al., 2016; Y. Zhao & Tatari, 2017; Zhou et al., 2017) ovat tarkastelleet sähköön liittyvän kasvihuonekaasuintensiteetin vähentämisen vaikutusta.

Tarkastellussa kirjallisuudessa mahdollisia elinkaarenaikaisia kasvihuonekaasupäästöjen vähennysarvioita sähkökuorma-autojen laajamittaiselle käyttöönotolle on tehty käyttämällä ehdotettuja markkinaosuusasteita (Zhou et al., 2017) ja yksinkertaistettuja diffuusiomalleja (González Palencia et al., 2020). Merkittävä tutkimusaukko kirjallisuudessa on se, että yhdessäkään aiemmista tutkimuksista ei käytetty toimintasäteen rajoittamista arvioitaessa sähkökuorma-autojen osuutta ja niiden vaikutusta kasvihuonekaasupäästöjen vähennyksiin eri suunnitteluhorisonteilla.

Vain kaksi tutkimusta (D. Y. Lee & Thomas, 2017; Zhou et al., 2017) ovat keskustelleet lyhyesti siitä, miten ympäristön lämpötila voi vaikuttaa sähkökuorma-autojen energiankulutukseen ja kasvihuonekaasupäästöihin. Missään tutkimuksessa ei kuitenkaan analysoitu ympäristön lämpötilan vaikutusta elinkaarenaikaisiin kasvihuonekaasupäästöihin, jotka aiheutuvat laajamittaisesta sähkökuorma-autojen käyttöönotosta.

Elinkaarikustannusten, kuten omistamisen kokonaiskustannusten (TCO, total cost of ownership), arviointi tunnustetaan logistiikkaoperaattoreiden keskeiseksi päätöksentekokriteeriksi, kun otetaan käyttöön vaihtoehtoisia käyttövoimia, kuten sähkökuorma-autoja (Anderhofstadt & Spinler, 2019; Moon & Lee, 2019; Tol et al., 2022). Yksityiskohtaisen parametrisoidun TCO-mallin kehittämisen sähkö- ja dieselkuorma-autojen elinkaarikustannusten analysointia varten tulisi kattaa sellaiset seikat kuin lataustoiminnot, menetetty hyötykuormakapasiteetti, energiatehokkuus, energiankulutus ja ajomatka.

Tällaisesta yksityiskohtaisesta parametrisoidusta TCO-mallista voisi olla hyötyä eri tavoin. Ensinnäkin se parantaa teknistaloudellisia lähestymistapoja soveltavissa strategisissa arvioinneissa käytettyjen päätöksentekomallien tarkkuutta (ASTRA 2.0, 2023; Fulton et al., 2009; Mulholland et al., 2018). Toiseksi se tarjoaa selkeämmän käsityksen logistiikkaoperaattoreiden sähkökuorma-autojen toimintaan liittyvistä keskeisistä kustannuskomponenteista. Lopuksi se tukee logistiikan ammattilaisia ja

tutkijoita tunnistamaan sähkökuorma-autojen mahdollisuudet ja rajoitukset eri luokissa (esim. matkaprofiilit, akkuteknologiat).

Sähkö- ja dieselkuorma-autojen elinkaarikustannusanalyysiin liittyvien tutkimusten tarkastelussa havaittiin seuraavat tutkimuspuutteet:

- Vaikka useat viimeaikaiset tutkimukset (Burnham et al., 2021; Ghandriz et al., 2020; Hao et al., 2022; Hunter et al., 2021; ITF, 2022; Nykvist & Olsson, 2021) arvioivat lataustoiminnan vaihtoehtoiskustannukset, vain yksi tutkimus (Mauler et al., 2022) on tarkastellut erityisesti työvuoron aikaiseen pikalataukseen käytettyyn aikaan liittyvää voitonmenetystä (IEA, 2023) ottaen huomioon lataustehon ja akun ominaisuuksien vaihtelut.
- Jotkut tutkimukset (ITF, 2022; Mauler et al., 2022) käyttivät kuljettajien pakollista taukoaikaa keskeisenä oletuksena arvioidessaan sähkökuorma-autojen ajomatkaa, mikä viittaa siihen, että lataus tapahtuu näiden taukojen aikana. Näissä tapauksissa kuljettajien oletettiin joko saavan korvauksen latausajasta (Mauler et al., 2022) tai ei (ITF, 2022). Mikään tutkimus ei kuitenkaan selvittänyt, miten latausmahdollisuudet kokonaisuutena – lastauksen, purkamisen ja/tai kuljettajan lepoaikojen aikana – vaikuttavat sähkökuorma-autojen TCO:hon.
- Vain yksi tutkimus (Ghandriz et al., 2020) tutki TCO:n herkkyyttä yksityiskohtaisille toiminnallisille tekijöille, kuten lastaamiseen/purkamiseen ja kesken vuoron lataukseen käytetylle ajalle. Missään tutkimuksessa ei kuitenkaan arvioitu sähkökuorma-autojen kokonaiskustannuksia käyttämällä näin yksityiskohtaisia käyttöaika-arvioita akku- ja laturiteknologian eri skenaarioissa.
- Suurin osa nykyisistä tutkimuksista perustuu ennalta määritettyihin ajotapahtumiin, jotka on luokiteltu ajosyklien, ajoneuvojen painoluokkien ja toimintaprofiilien, kuten kaupunki-, lyhyen ja pitkän matkan reittien mukaan (Abhyankar et al., 2022; Basma et al., 2021; Burnham et al., 2021; Nykvist & Olsson, 2021; Phadke, Khandekar, Abhyankar et al., 2021; Vijayagopal & Rousseau, 2021). Missään tutkimuksessa ei kuitenkaan käytetty dynaamista lähestymistapaa optimaalisten ajomatkojen tai akun koon analysointiin eri ajosyklien, kokonaispainojen ja matkaprofiilien välillä ottaen huomioon erilaiset akku- ja latausteknologian skenaariot.

Mainittujen tutkimusaukkojen kattamiseksi tässä tutkimuksessa määritettiin erilaiset akku- ja laturiteknologian kehityksen tulevaisuusskenaariot lyhyen aikavälin (2021–2025), keskipitkän aikavälin (2025–2035) ja pitkän aikavälin (2035–2055) kehitykselle kirjallisuuden perusteella. Skenaariot kuvattiin akku- ja latauspesifikaatioiden (esim. akun kapasiteetti, operatiivinen latausteho ja tielatausjärjestelmä) perusteella sähkökuorma-autojen kehityksen eri tasoina, sisältäen "nykyinen teknologia" (lyhyt

aikaväli), "parannetut ajoneuvot" (keskipitkä aikaväli), "paremmat ajoneuvot ja lataus" (keskipitkä aikaväli) ja "kohti täyttä sähköistämistä" (pitkä aikaväli) -skenaariot. Akku- ja lataustekniikan nopean kehityksen vuoksi aikavälit ja tekniset tiedot päivitettiin tutkimuksen aikana. Taulukossa 1 on esitelty joitakin keskeisiä akku- ja latausteknologian oletuksia.

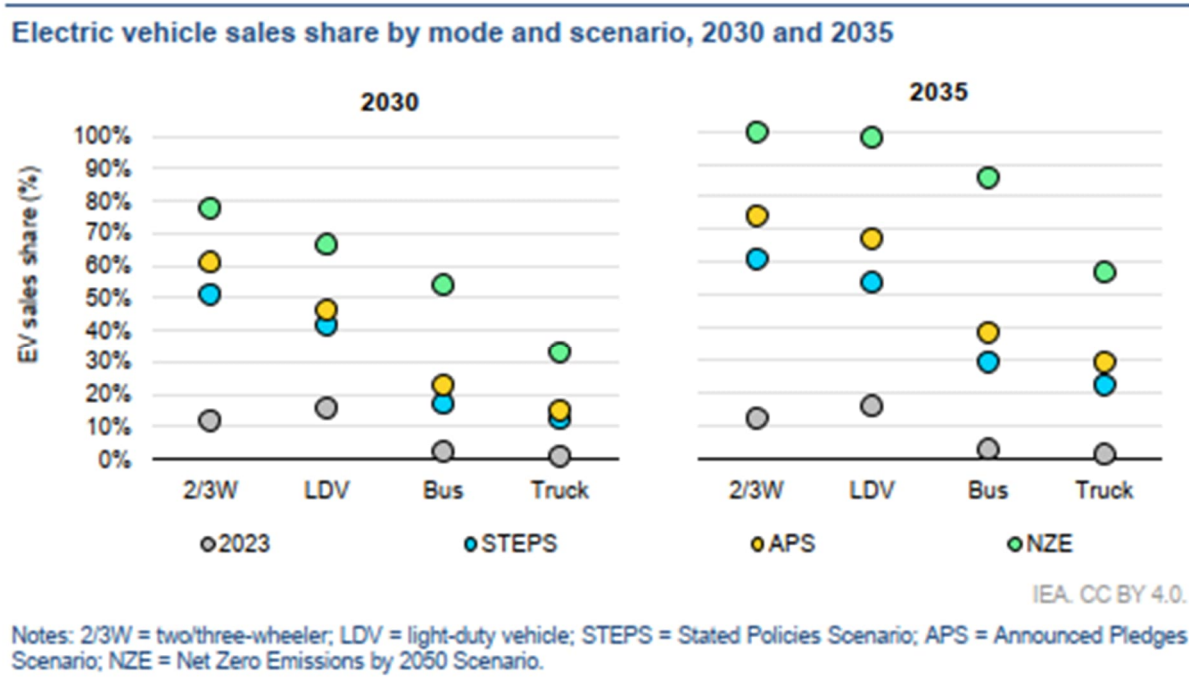
Taulukko 1. Teknologiset oletukset tarkastelluissa skenaarioissa.

Muuttujat	Aikaväli	Eritelmät	Tutkimuksen osa-alue		
			Elinkaaripäästöt	TCO	Latausverkko
Akun gravimetrisen energiatiheys (Wh/kg)	lyhyt	Skenaario(t)	S1-S2	ST-BSS	-
		Arvo(t)	128	125	-
	keskipitkä	Skenaario(t)	S3-S4	MT-BSS	MT
		Arvo(t)	240	250	250
	pitkä	Skenaario(t)	S5	LT-BSS	LT
		Arvo(t)	360	400	400
Akun käyttöiän lataussyklit	lyhyt	Skenaario(t)	S1-S2	ST-BSS	-
		Arvo(t)	3,000	3,000	-
	keskipitkä	Skenaario(t)	S3-S4	MT-BSS	MT
		Arvo(t)	4,000-5,000	4,500	-
	pitkä	Skenaario(t)	S5	LT-BSS	LT
		Arvo(t)	6,000	6,000	-
Pikalatauksen lataustehot	lyhyt	Skenaario(t)	S1-S2	ST-BSS	-
		Arvo(t)	Jopa 150 kW	Jopa 1,0 MW	-
	keskipitkä	Skenaario(t)	S3-S4	MT-BSS	MT
		Arvo(t)	Jopa 450 kW	Jopa 1,0 MW	Jopa 1,2 MW
	pitkä	Skenaario(t)	S5	LT-BSS	LT
		Arvo(t)	Jopa 450 kW	Jopa 1,0 MW	Jopa 1,2 MW

3. Raskaan sähköisen liikenteen tilannekuva

3.1 Sähkökuorma-autojen markkinatilanne

Sähkökuorma-autojen globaali myynti oli IEA:n (2025) mukaan vuonna 2024 noin 94 000 autoa vuodessa, josta 76 000 autoa myytiin Kiinassa ja noin 12 000 autoa Euroopassa, Yhdysvaltojen ja muun maailman myynnin jäädessä näihin verrattuna hyvin pieneksi. Kiinassa sähkökuorma-autojen markkinaosuus oli noin 4 % ja Euroopassa noin 2 % kuorma-autojen kokonaismyynnistä. IEA ennakoii kuitenkin markkinaosuuden kasvavan 10–33 prosenttiin vuoteen 2030 mennessä ja 20–55 prosenttiin vuoteen 2035 mennessä (kuva 2), kun sähkökuorma-autojen omistamisen kokonaiskustannus (TCO) painuu Kiinassa ja Euroopassa dieselkuorma-autoja alemmaksi.



Kuva 2. Sähkökuorma-autojen markkinaosuuden skenaarioita (IEA 2024).

Suomessa sähkökuorma-autoja oli liikennekäytössä 126 kappaletta vuoden 2024 lopussa ja vuoden 2025 tammi-elokuun aikana on ensirekisteröity 48 sähkökuorma-autoa (Tilastokeskus 2025).

3.2 Akunvaihtojärjestelmät

Akunvaihtojärjestelmät (Battery Swapping Systems, BSS) tarjoavat vaihtoehdon suoralle akkujen lataukselle ajoneuvossa. Ne mahdollistavat nopean ajotehtävän suorittamiseen palaamisen vaihtamalla tyhjä akku täyteen ladattuun erillisellä akunvaihtoasemalla. Konsepti kehitettiin vastaamaan sähköajoneuvojen pitkien latausaikojen haasteeseen, erityisesti raskaassa tavaraliikenteessä, joissa ylimääräiset tauot vaikuttavat suoraan tuottavuuteen.

Tässä tutkimuksessa BSS:n roolia raskaiden kuorma-autojen sähköistämisessä tutkittiin yhdistämällä systemaattinen kirjallisuuskatsaus ja kymmenen puolistrukturoitua haastattelua. Kirjallisuuskatsaus kattoi yli 90 tieteellistä ja ammatillista kirjallisuuslähdetä, jotka käsittelivät globaalia käyttöönottoa, teknologioita, kustannuksia, verkostovaikutuksia ja vertailuanalyysijä. Haastattelut tehtiin sidosryhmien kanssa, jotka edustivat akateemista kenttää, teollisuutta ja start-up-yrityksiä, laitevalmistajia, logistiikkaoperaattoreita ja politiikan asiantuntijoita. Tämä monimenetelmäinen lähestymistapa mahdollisti sekä teoreettisten näkemysten että käytännön kokemusten yhdistämisen. Tutkimuksen pohjalta teknologian nykytila eri alueilla on taulukon 2 mukainen.

Taulukko 2. Akunvaihdon globaali tila raskaissa kuorma-autoissa

Maa/Alue	Nykytila
Kiina	Satoja aktiivisia asemia, vahva valtion tuki ja kansalliset politiikkakehykset
Saksa	Pilotti- ja tutkimusvaihe, ei vielä laajennettu
Ruotsi/Norja	Tutkimus käynnissä, ei pilotteja
Australia	Toiminnassa pieniä akunvaihtoasemia (rajallinen verkosto)
USA	Vielä konseptuaalinen, ei raskaille kuorma-autoille suunnattuja pilotteja

BSS tarjoaa useita etuja. Se minimoi seisonta-ajan, koska akut voidaan vaihtaa muutamassa minuutissa. Erottamalla akun omistajuuden ajoneuvosta, Battery-as-a-Service (BaaS) -malli pienentää kuorma-autojen hankintahintaa. Vaihtoasemat voivat myös tukea sähköverkkojen toimintaa lataamalla vara-akkuja pienemmällä teholla kuin suurteholatauksessa ja kohdistuen latauksen vähäisen sähkönkulutuksen tunteihin. Keskitetty akkujen hallinta parantaa turvallisuuden ja kunnon seurantaa, ja modulaariset rakenteet mahdollistavat viallisten segmenttien vaihtamisen koko paketin sijaan.

Hyödyistä huolimatta teknologia kohtaa merkittäviä haasteita. Infrastrukturi on pääomaintensiivistä, koska tarvitaan automatisoituja asemia ja suuria varastoakkujen määriä. OEM-valmistajien välinen standardoinnin puute rajoittaa yhteen toimivuutta ja lisää toimittajalukkiutumisen riskiä. Akun omistajuuden ja elinkaaren hallinta on edelleen ratkaisematta. Lisäksi modulaariset akut eivät ole vielä laajasti käytössä raskaissa kuorma-autoissa ja standardointiprosessi on monimutkainen. Sähköistysteknologioiden etuja ja haasteita voidaan jäsenellä taulukon 3 mukaisesti.

Taulukko 3. Kuorma-autojen sähköistysteknologioiden vertailu

Teknologia	Edut	Haasteet/Rajoitukset	Parhaiten soveltuvat käyttötapaukset
Akunvaihto (BSS)	Nopea (3–5 min), alempi hankintahinta BaaS-mallilla, vähentää verkon huipputehotarvetta	Korkeat investointikustannukset, standardoinnin puute, toimittajalukkiutuminen	Kaupunkilogistiikka, satamat, teollisuuskalustot
Megawatti-lataus (MCS)	Joustavuus pitkille matkoille, suuri latausteho	Verkon vahvistustarve, huipputehon kuormitus	Pitkän matkan kuljetukset, joustavat reitit
Vety-polttokennot (FCET)	Pitkä toimintamatka, korkea energiatiheys, nopea tankkaus	Energiahäviöt, kallis infrastruktuuri, vihreä vety kallista ja rajallista	Erittäin raskaat tai pitkän matkan kuljetukset

Näkemykset BSS:stä vaihtelevat eri sidosryhmien kesken (taulukko 4). Akateemiset asiantuntijat pitävät sitä lupaavana, mutta rajattuna ratkaisuna, joka soveltuu lähinnä hyvin määriteltyihin kalustokokonaisuuksiin. Poliittiset päättäjät korostavat, että kilpailukyky edellyttää tukia ja sääntelyä. Teollisuuden edustajien mielipiteet ovat jakautuneet: teknologiatoimittajat korostavat BaaS-mallien tarjoamia mahdollisuuksia, kun taas laitevalmistajat painottavat integraation ja standardoinnin esteitä. Logistiikkaoperaattorit arvostavat lyhyempiä seisokkeja ja alhaisempia hankintahintoja, mutta huomauttavat korkeista infrastruktuurikustannuksista ja rajallisesta soveltuvuudesta heterogeeniseen kalustoon.

Taulukko 4. Sidosryhmien näkemykset akunvaihtoteknologiasta.

Sidosryhmä	Myönteiset näkemykset	Huolenaiheet / Rajoitukset
Akateeminen kenttä	Lupaava homogeenisille kalustoille	Liian rajattu laajaan käyttöönottoon
Poliittiset päättäjät	Mahdollisuuksia tukien ja sääntelyn avulla	Ei kilpailukykyinen ilman politiikkakehyksiä
Teollisuus (teknologia)	Mahdollisuuksia BaaS-liiketoimintamalleissa	Markkinoiden pirstaloituminen, yhteentoimivuusongelmat
OEM-insinöörit	Kiinnostus tekniseen innovaatioon	Integroinnin ja standardoinnin haasteet
Logistiikkaoperaattorit	Alhaisempi hankintahinta, lyhyemmät seisokit	Korkeat kustannukset, toimittajalukkiutuminen, rajallinen soveltuvuus

Kirjallisuuskatsauksen ja haastattelujen tulokset osoittavat, että BSS on arvokas mutta kontekstisidonnainen ratkaisu raskaiden kuorma-autojen sähköistämisessä. Raskaiden kuljetusten päästövähennyksiin ei ole olemassa yhtä ainoaa 'hopealuotia'. Tulevaisuuden rahtiliikenne tulee todennäköisesti perustumaan eri ratkaisujen yhdistelmään – vetyyn, megawattilataukseen ja akunvaihtoon. BSS on erityisen houkutteleva homogeenisille kalustoille, joilla on ennustettavat ajosyklit, mutta sen laajempi käyttöönotto riippuu kustannusten alenemisesta, standardoinnista ja poliittisesta tuesta.

4. Sähkökuorma-autojen toimintaedellytykset

4.1 Tiekuljetusten tilanne Suomessa

Valtaosa Suomessa tapahtuvasta tavarankuljetuksesta tapahtuu raskaassa tieliikenteessä niin kuljetussuoritteiden kuin kuljetettujen tavaroiden painollakin mitattuna. Muun Euroopan tapaan myös Suomessa tiekuljetusten osuus kuljetussuoritteesta on edellisen vuosikymmenen aikana noussut. (Traficom 2024a) Kokonaisuudessaan Suomessa tieliikenteessä kuljetettava tavaramäärä on edellisen vuosikymmenen aikana kuitenkin vähentynyt, ja myös kuljetussuorite on ollut vuodesta 2022 lähtien laskussa (Suomen virallinen tilasto 2024). Raskaan tieliikenteen merkitystä Suomessa korostavat kuljetusten suuri osuus logistiikkamarkkinoiden koosta (Solakivi et al. 2023). SKAL (2021) arvioi maanteiden tavaraliikenteen vuosittaiseksi liikevaihdoksi 6,5 miljardia euroa, ja kuljetusalalla työskentelevien henkilöiden määräksi 50 000 henkilöä.

Raskaan tieliikenteen toimintaa ja ajoneuvoja säännellään niin kansainvälisesti kuin kansallisestikin (Pöllänen et al. 2015). Suomessa sallitut raskaan liikenteen ajoneuvojen mitat ja massat eroavat muusta Euroopasta merkittävästi, sillä sekä maksimipituudet että -massat ovat Suomessa muuta Eurooppaa suurempia (ITF 2019a, ITF 2019b). Sallittujen mittojen ja massojen korkeampi taso on lisännyt tiekuljetusten kilpailukykyä, ja esimerkiksi yli 68 tonnin ajoneuvoyhdistelmien osuus raskaan liikenteen kuljetuksista on noussut merkittävästi (Traficom 2025a, Suomen virallinen tilasto 2024).

Keskimääräisen yrityskoon kasvusta huolimatta lähes puolet Suomessa toimivista raskaan tieliikenteen kuljetusyrityksistä liikennöi yhdellä ajoneuvolla, ja vain noin neljäsosassa yrityksistä ajoneuvoja on käytössä enemmän kuin kolme (SKAL, 2021). Raskaan tieliikenteen kilpailluilla markkinoilla alihankintaketjut ovat yleisiä, mikä mahdollistaa laajaa palveluntarjontaa ja halvempia hintoja, mutta aiheuttaa haasteita kuljetusyritysten toiminnan kannattavuuden kannalta (Traficom 2025).

Suomessa niin väestö kuin teollisuuskin on levittäytynyt laajasti lähes koko maahan, mikä muodostaa raskaan liikenteen toimintaympäristön haasteelliseksi toiminnan tehokkuuden kannalta. Niin maantieteelliset kuin taloudellisetkin tekijät muodostavat Suomesta kuljetusintensiivisen maan suhteessa esimerkiksi väkilukuun tai bruttokansantuotteeseen. (Ritvanen et al. 2011) Määrällisesti suurimmat raskaan liikenteen virrat keskittyvät pääkaupunkiseudulle johtaville valtateille. Laajalti ympäri Suomea levittäytyneen teollisuustoiminnan vaikutukset kuitenkin näkyvät liikennemäärissä, sillä raskaan liikenteen osuus kokonaisliikennemääriin nähden on merkittävän suuri useilla tieosuuksilla ympäri Suomea. (Mäntynen et al. 2022)

Suomessa liikennekäytössä olevia kuorma-autoja on noin 90 000, joista noin kolmannes on rekisteröity luvanvaraiseen liikenteeseen. Valtaosa ajoneuvoista hyödyntää fossiilisia polttoaineita, sillä vaihtoehtoisia käyttövoimia hyödyntävien ajoneuvojen osuus kokonaisuudesta on vain yksi prosentti. (Traficom 2025b) Vaihtoehtoisia käyttövoimia

hyödyntävien kuorma-autojen ennustetaan kuitenkin yleistyvän, ja esimerkiksi vuonna 2035 täyssähköisiä kuorma-autoja ennustetaan olevan käytössä lähes 7 000.

Raskaan tieliikenteen kuljetukset koetaan myös elinkeinoelämän näkökulmasta selkeästi tärkeimpänä kuljetusmuotona. Tiekuljetusten merkitys korostuu niiden ollessa osa lähes jokaista kuljetusketjua. palveluntarjonta on kokonaisuudessaan laajaa ja kysyntään pystytään yleisesti vastaamaan nopeasti ja kustannuksiltaan kilpailukykyisesti. (Pöllänen et al. 2015, s. 40) Elinkeinoelämän keskusliitto (2022, s. 3) linjaa liikenteen väyläverkon ja logistiikkajärjestelmän olevan yritysten kilpailukyvyyn edellytys. Fossiilivapaa liikenne infrastruktuureineen nähdään väylien modernisoinnin ja digitalisoinnin ohella olennaisimpina tavoitteena vuoteen 2050 mennessä.

Raskaan tieliikenteen suoritemäärien ennustetaan nousevan tulevaisuudessa aina vuoteen 2040 asti. Kasvun ennustetaan kohdistuvan maantieverkolla etenkin ajoneuvoyhdistelmiin, vaikka useat epävarmuudet päätöksentekoon ja yhteiskunnan tukitoimiin liittyen luovatkin epävarmuutta tulevaisuutta ajatellen. Maantieteellisesti raskaan liikenteen suoritemäärien kasvun ennustetaan keskittyvän Etelä-Suomen alueelle ja maan tärkeimmille pääväylille, kuten valtateille 1, 3 ja 4.

Raskas tieliikenne Suomessa voidaan jakaa sektoreihin monin eri tavoin, esimerkiksi erilaisten toimialojen mukaan. Toimialojen väliset kuljetustarpeet ja -kysynät voivat vaihdella merkittävästi toisistaan, ja myös kuljetusintensiteetin suhteen toimialojen välillä voi olla suuriakin eroja. Teollisuus muodostaa valtaosan raskaan tieliikenteen kysynnästä Suomessa, mutta eri teollisuuden toimialojenkin välillä on eroja niin kuljetusmäärissä kuin kuljetettavan tavarán arvossakin mitattuna. On myös huomioitava, että esimerkiksi teollisuuden rakennemuutokset voivat heijastua voimakkaasti eri teollisuuden alojen luomaan kuljetuskysyntään. (likkanen 2024)

likkasen (2004) mukaan vuonna 2002 teollisuuden kuljetukset ovat muodostaneet 82 prosenttia kotimaan liikenteen kuljetussuoritteesta. Maarakentaminen ja muut kuljetukset, ovat olleet muita merkittäviä toimialoja kuljetussuoritteella mitattuna. Teollisuuden kuljetussuoritteesta metsäteollisuuden osuus oli lähes puolet, metalli-, kemian-, ja elintarviketeollisuus yhdessä rakennusaineteollisuuden ja polttoaineiden valmistuksen kanssa olivat muita merkittäviä teollisuuden aloja kuljetussuoritteilla mitattuna. Teknologiateollisuuden osuus kuljetussuoritteista oli vähäinen, mutta arvonlisäyksellä mitattuna sen merkitys korostui voimakkaasti. (likkanen 2004)

Sundbergin (2009) mukaan tilanne teollisuuden kuljetussuoritteiden osalta pysyi monilta osin samanlaisena vuonna 2007. Tiekuljetukset muodostivat edelleen valtaosan teollisuuden kuljetussuoritteesta, eikä teollisuuden alojen välisissä kuljetussuoritteissa tapahtunut merkittäviä muutoksia.

Sekä Mäntynen et al. (2017) että Mäntynen et al. (2022) nostavat esiin Suomen raskaan tieliikenteen osalta toisiaan vastaavat olennaisimmat sektorit. Metsä-, elintarvike, -

metalli, ja kemianteollisuuden lisäksi maa- ja metsätalous, rakennusteollisuus ja kauppa nähdään merkittävänä raskaan tieliikenteen kysynnän kannalta. Molemmissa selvytyksissä raskaan tieliikenteen jakaminen sektoreihin on toteutettu hyödyntämällä Tilastokeskuksen (Suomen virallinen tilasto 2024) tieliikenteen tavarankuljetustilastoa, jossa kuljetukset on luokiteltu tavaralajeittain. Tavaralajien perusteella kuljetukset on sijoitettu osaksi eri sektoreita, jotta niiden välinen vertailu olisi mahdollista.

Erilaisten raskaan liikenteen sektorien osalta on olennaista huomata niiden kuljetussuoritteiden välisten erojen lisäksi maantieteelliset erot. Eri sektoreilla tavaravirrat keskittyvät maantieteellisesti eri tavoin ympäri Suomea. Esimerkiksi metsäteollisuuden kuljetukset jakautuvat laajalti ympäri Suomea. Raaka-aineiden hankinta ja laajalti ympäri Suomea levittäytyneet tuotantolaitokset korostavat alemman tieverkon merkitystä. Sen sijaan esimerkiksi elintarviketeollisuuden ja päivittäistavarakaupan kuljetuksissa tavaravirrat keskittyvät vahvasti merkittävimmille valtateille. (Mäntynen et al. 2022)

Kuljetussuoritteilla mitattuna metsäteollisuus luo valtaosan Suomen raskaan tieliikenteen kuljetustarpeesta. Teollisuuden aloista myös polttoaine-, elintarvike-, metalli- ja rakennusteollisuuden osuudet korostuvat kuljetussuoritteilla mitattuna. Kappaletavara- ja maa-aineskuljetusten osuudet ovat myös huomattavia, vaikka etenkin maa-ainesten kuljetuksissa kuljetusetäisyydet ovat yleisesti erittäin lyhyitä. Kuljetusetäisyyksillä mitattuna etenkin elintarvike- ja polttoaineteollisuuden kuljetukset erottuvat joukosta. Etenkin metsä- ja polttoaineteollisuuden kuormausasteet eli kuormapainot suhteessa ajoneuvon kantavuuteen ovat korkeita, kun taas esimerkiksi kappaletavarakuljetuksissa ja metalliteollisuuden kuljetuksissa kuormausaste ei rajoita kuljetuksia.

4.2 Käyttöprofiileja palveleva latausinfrastruktuuri

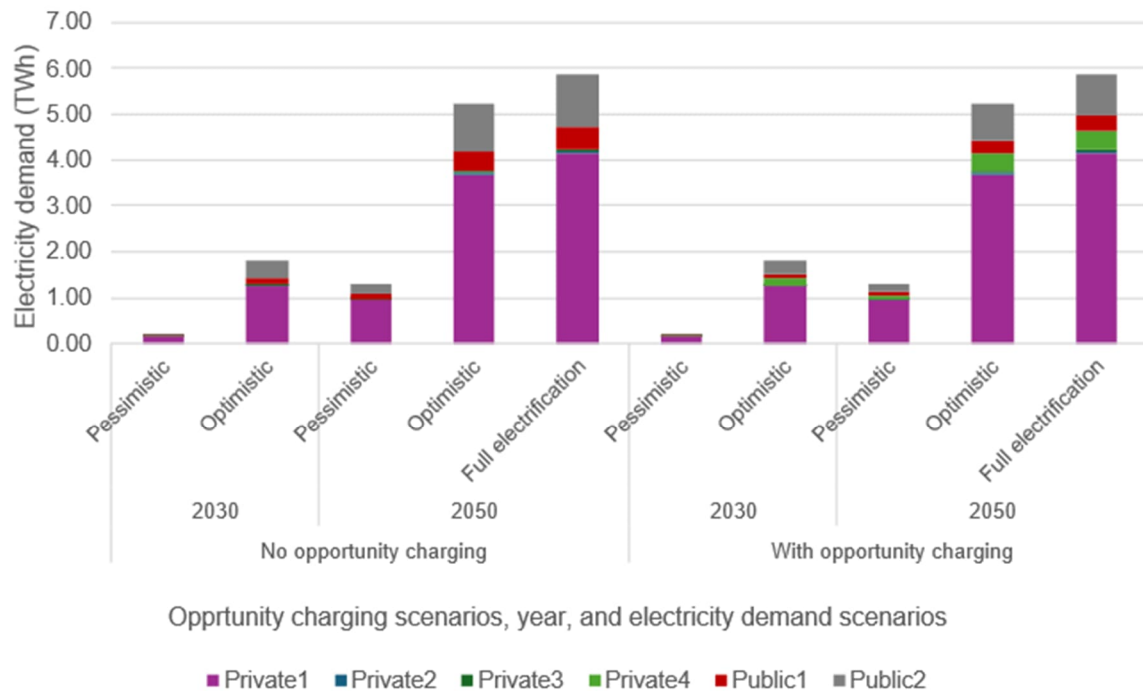
Sähköautojen tarvitseman latausinfrastruktuurin tutkimuksessa yhdistettiin erittäin yksityiskohtainen matkaketjuanalyysi Tieliikenteen tavarankuljetustilaston vuosien 2018–2022 aineistojen pohjalta ja kansallinen kuorma-autokantamalli (Liimatainen ym. 2023). Tutkimuksessa pyrittiin määrittämään lataustoimintojen tehon ja sijainnin tiedot eri latausmahdollisuuksissa ("työvuoron ulkopuolinen" terminaalilataus pakollisten pitkien taukojen aikana, "kesken työvuoron" pikalataustoiminnot pakollisten lyhyiden taukojen ja lastauksen/purkamisen aikana sekä megawattilataus maanteiden latausasemilla), ajoneuvojen ja käyttömatkan määrittelyt sekä sähkökuorma-autojen ajoprofiilit ja energiankulutuksen arviot. Tuloksissa esitetään sähkökuorma-autojen latausenergian tarve Suomessa keskipitkällä (2030) ja pitkällä (2050) aikavälillä erilaisissa kuorma-autokannan sähköistytksen skenaarioissa. Tuloksia analysoitiin

luokiteltuna kuorma-autotyypeittäin (N2, KAIP, KAPP, KAVP) ja ajoprofiileittain (kaupunkijakelu, lyhytmatkainen, pitkämatkainen).

Tulosten mukaan noin 70 % sähkökuorma-autojen tarvitsemasta sähköstä Suomessa voidaan toimittaa terminaalilatauspisteiden kautta, jolloin kuorma-autot voidaan ladata täyteen ennen matkan aloittamista. Loput 30 % energiantarpeesta katetaan latauksella pakollisten pitkien taukojen aikana, suurteholatauksella lyhyiden taukojen aikana ja mahdollisella latauksella lastauksen tai purkamisen aikana. Tulokset viittaavat siihen, että Suomessa tarvitaan enemmän pikalatausinfrastruktuuria (CCS) kuin megawattilatausinfrastruktuuria (MCS). MCS-järjestelmiä käytetään pääasiassa pääteiden latausasemilla lyhyiden pakollisten taukojen aikana. Samanlaisia johtopäätöksiä on tehty useissa muissa eurooppalaisissa tutkimuksissa (Enedis SA et al., 2024; Robinson, 2023). Kuva 3 havainnollistaa tarkemmin sähkön kysyntäarvioita eri skenaarioissa ja latauspaikoissa Suomessa.

Kuvan 3 latausryhmät on määritelty kolmen erilaisen työaikataulun perusteella ajovuoroille ja ajoprofiileille. Private1 sisältää "off-shift" -lataustoiminnot ennen matkan aloittamista kahden kuljettajan vuorossa, lyhyillä ja pitkillä matkoilla sekä yhden kuljettajan vuorossa. Private2 sisältää "off-shift" -lataustoimintoja ennen matkan aloittamista kahden kuljettajan vuoroilla kaupunkimatkoilla. Private3 sisältää kahden kuljettajan vuorojen kaupunkimatkojen "off-shift" -latausaktiviteetteja pakollisten pitkien taukojen aikana. Private4 sisältää mahdollisuuden ladata lastauksen/purkamisen aikana. Public1 sisältää kahden kuljettajan vuorojen lyhyiden ja pitkien matkojen sekä yhden kuljettajan vuorojen latauksen pakollisten pitkien taukojen aikana. Public2 sisältää "kesken työvuoron" latausaktiviteetteja pakollisten lyhyiden taukojen aikana.

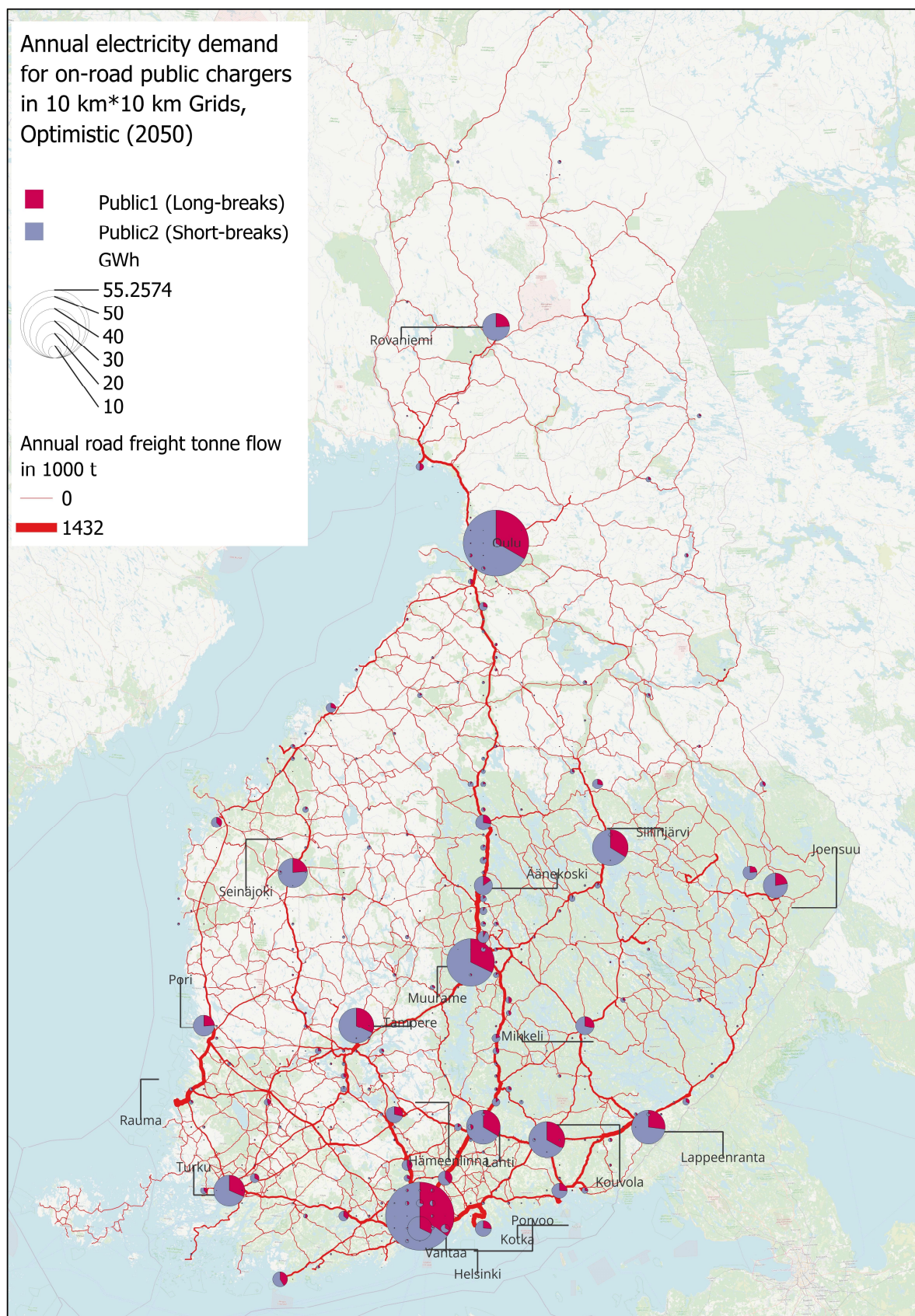
Electricity demands for different charging groups in Finland



Opportunity charging scenarios, year, and electricity demand scenarios

Kuva 3. Sähköntarpeen jakautuminen lataustyypeittäin eri sähköistysskenaarioissa 2030 ja 2050, tilanteissa, jossa käytetään tai ei käytetä mahdollisuuslatausta lastauksen/purkamisen aikana.

Madollisuuslataus lastauksen/purkamisen aikana voi täydentää "kesken työvuoron" latausta, joka tapahtuu pakollisten lyhyiden taukojen aikana maantieasemilla. Se ei kuitenkaan vähennä merkittävästi matka-ajan viivästyksiä etenkin täysperävaunuyhdistelmillä, joiden kokonaispaino on yli 40 tonnia. Toimitusaikaviiveet, jotka ovat yksi suurimmista esteistä sähkökuorma-autoille, voitaisiin välttää enintään 40 tonnin kuorma-autojen osalta MCS:n käytöllä pakollisten lyhyiden taukojen aikana. Kuitenkin 35 prosentin osuus maanteiden tavarakuljetuksista (tonnikilometreinä) raskaimmilla yhdistelmäajoneuvoilla voi viivästyä keskimäärin 30 tuntia 100 000 kilometriä kohden, koska latausteho on MCS:ää käytettäessäkin riittämätön pakollisten lyhyiden taukojen aikana. Vuosittainen latausenergian tarve julkisissa latauspisteissä nopean sähköistyksen skenaariossa vuonna 2050 Suomen tieverkolla on esitetty kuvassa 4.



Kuva 4. Julkisen latauksen energiantarve Suomessa 2050 nopean sähköistymisen skenaariossa.

4.3 Kuorma-autojen ja logistiikkakeskusten käyttöprofiilien asettamat mahdollisuudet ja haasteet

Raskaan liikenteen sähköistymistä Suomessa tarkasteltiin vielä erityisesti kuljetusalan operatiivisen toiminnan näkökulmasta. Ajoneuvojen käyttömallien ja logistiikkakeskusten toimintamallien merkitystä raskaan liikenteen sähköistymisen kannalta tarkasteltiin olennaisimmilla kuljetusalan sektoreilla.

Suomessa raskaan liikenteen rooli korostuu niin yhteiskunnallisesta kuin elinkeinoelämänkin näkökulmasta. Niin väestön kuin teollisuudenkin levittäytyminen laajasti ympäri maata tekee Suomesta erittäin kuljetusintensiivisen maan. Kuljetusalalla toimivat yritykset ovat kuitenkin pääosin pieniä ja kuljetettavat tavaravirrat ohuita. Teollisuuden kuljetusten lisäksi maa- ja metsätalouden sekä kaupan kuljetukset muodostavat raskaan tieliikenteen merkittävimmät sektorit. Pitkät kuljetusmatkat ja suuret kuljetettavat massat ovat tyypillisiä Suomen raskaassa liikenteessä.

Sähköistyminen voi muuttaa raskaan tieliikenteen toimintaa merkittävästi. Sähköisten kuorma-autojen käyttömalleja on suunniteltava entistä laajemmin etukäteen. Lyhyemmät kantamat ja suuret energiankulutuksen vaihtelut heikentävät toiminnan joustavuutta. Logistiikkakeskuksissa muodostuu tarvetta latausinfrastruktuurille, ja sähköistymisen vaatima muutostarve voi heijastua logistiikkakeskusten toimintamalleihin.

Suomen kuljetusalan näkökulmaa raskaan liikenteen sähköistymiseen kartoitettiin asiantuntijahaastatteluilla. 11 teemahaastattelua toteutettiin yhdessä kuljetusyrityksissä työskentelevien asiantuntijoiden kanssa. Asiantuntijoiden edustamat yritykset toimivat erilaisilla toiminta-alueilla ja kuljetusalan sektoreilla, mikä mahdollisti tutkittavan aiheen käsittelyn useasta näkökulmasta. Sähköistymisen mahdollisuudet ja haasteet koettiin erilaisissa yrityksissä eri tavoin.

Haastatteluissa korostuivat ennen kaikkea kuljetusyritysten toimintamalleihin, asiakkaisiin, teknologioihin ja toimintaympäristöön liittyvät seikat. Toimintamallit ovat kehittyneet nykyisten teknologioiden tarjoamien mahdollisuuksien rajoissa, ja sähköisten ajoneuvojen sovittaminen nykyisiin toimintamalleihin nähtiinkin hankalana. Sähköiset ajoneuvoteknologiat nähtiin merkittävänä pullonkaulana. Etenkin ajoneuvojen ympärivuorokautinen käyttö, aikakriittiset kuljetukset ja korkeat päivittäiset kilometrimäärät koettiin haasteina sähköistymisen kannalta. Logistiikkakeskuksissa latausinfrastruktuurin rakentuminen ja riittävän lataustehon varmistaminen koettiin haasteina.

Asiakasyhteistyön merkitys nähtiin sähköistymisen näkökulmasta kriittisenä, jotta muutoksen toteuttaminen ei jää ainoastaan kuljetusyrityksen harteille. Kuorman purku-

ja lastausaikojen hyödyntäminen lataukseen nähtiin tärkeänä muutoksen mahdollistajana, mikä korostaa kuljetusyrityksen ja asiakkaan välisen yhteistyön merkitystä. Yleisen taloustilanteen nähtiin hidastaneen muutoksen vauhtia viime vuosina, ja poliittisen poukkoilevuuden sekä sääntelyn monimutkaisuuden luovan epävarmuutta tulevaisuuden näkökulmasta. Sähköisen ajoneuvoteknologian potentiaali kuitenkin tunnistettiin laajasti, eikä suurempaa muutosta alan toimintamalleihin pidetty mahdottomana. Teknologinen kehitys, taloudellisen kilpailukyvyn säilyminen ja toimintaympäristön soveltuvuus koettiin kriittisiksi tekijöiksi raskaan liikenteen sähköistymisen kannalta.

5. Kuorma-autokannan sähköistyksen vaikutukset

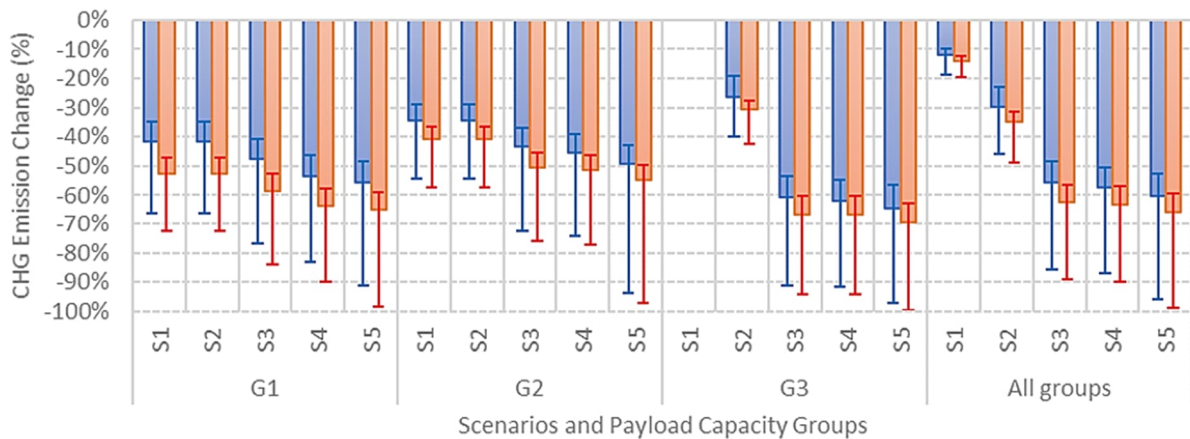
5.1 Elinkaaripäästöt

Elinkaaripäästöjen tutkimuksessa sovellettiin yksityiskohtaista parametrista elinkaaren aikaista kasvihuonekaasupäästöanalyysiä erilaisissa sähköistysskenaarioissa. Elinkaarenaikaisten kasvihuonekaasupäästöjen analyysin pääasialliset tietolähteet olivat tekniset raportit ja akateemiset julkaisut.

Järjestelmän raja tässä analyysissä sisältää sähkö- ja dieselkuorma-autojen valmistuksen ja käytön. Valmistusvaihe sisältää raaka-aineiden louhinnan ja kuorma-autojen tuotannon kasvihuonekaasupäästöt. Käyttövaihe sisältää polttoaineen/sähkön well-to-wheel-päästöt (WTW) sekä huolto- ja korjausvaiheet. Sähkökuorma-autojen elinkaaren loppuvaihe jätettiin tämän tutkimuksen ulkopuolelle seuraavista syistä: 1) päästöjen odotettiin olevan hyvin alhaiset muihin vaiheisiin verrattuna, 2) analyysin tarpeettoman monimutkaisuuden välttäminen, 3) esimerkiksi akun ja muiden sähkökomponenttien uudelleenkäyttöä ja kierrätystä koskevien päästötietojen puute. Analyysissä käytetään kahta erilaista lähestymistapaa, ennuste- ja backcasting-menetelmiä.

Ennustemenetelmässä keskeisten muuttujien oletusten epävarmuustekijöiden vaikutusta analysoitiin herkkyysanalyysin sekä huonoimman ja parhaan mahdollisen skenaarion analyysin avulla. Lisäksi kasvihuonekaasupäästöjen vähennysten eri tasot eri suunnitteluhorisonteilla (ST, MT, LT) arvioitiin viiden erilaisen BET-kaluston osuusoletuksen perusteella (mukaan lukien kaksi skenaariota ST-horisontille (S1-S2), kaksi skenaariota MT-horisontille (S3-S4) ja yksi skenaario LT-horisontille (S5).

Kuvassa 5 esitetään kasvihuonekaasupäästöjen muutokset, mukaan lukien epävarmuuspalkit, jotka on johdettu huonoimmista ja parhaista skenaarioista eri hyötykuormaluokissa (G1–G3) ja sähköistysskenaarioissa (S1–S5). Elinkaarenaikaisten kasvihuonekaasupäästöjen analyysin tulokset osoittavat, että sähköntuotannon hiilidioksidipäästöjen vähentämisellä akkujen lataamisessa ja akkujen tuotannossa on merkittävä rooli elinkaarenaikaisen kasvihuonekaasupäästöjen vähentämisessä. Lisäksi erilaisten sähkötievaihtoehtojen rakentamisen epävarmuus elinkaarenaikaisten kasvihuonekaasupäästöjen vähennyksiin on erittäin suuri skenaariossa S2, jossa sähkötievaihtoehto on mukana. Muiden keskeisten parametrien epävarmuusvaikutus elinkaarenaikaisten kasvihuonekaasupäästöjen vähennyksiin on hyvin vähäinen verrattuna edellä mainittuihin seikkoihin.



Kuva 5. Kasvihuonekaasupäästöjen vähennyspotentiaali vaihteluväleineen eri sähköistysskenaarioissa ja hyötykuormakapasiteettiryhmissä Suomessa

Backcasting-menetelmässä hahmoteltiin kokonaisuus, jolla voidaan saavuttaa kansalliset kunnianhimoiset hiilidioksidipäästöjen vähentämistavoitteet (kasvihuonekaasupäästöjen puolittaminen 2030 ja lähes päästöttömän tavaraliikenteen saavuttaminen 2050). Backcasting-analyysin tulokset osoittavat, että elinkaarenaikaisen kasvihuonekaasupäästöjen vähentäminen noin 94 % Suomessa on saavutettavissa parhaiten täyttämällä seuraavat keskeiset ehdot:

- Edistysaskeleet akku- ja lataustekniikoissa teknologisen kehitysskenaarion S3 mukaisesti;
- 100 % päästöttömän sähkön saatavuus sekä akkujen lataamiseen että akkujen tuotantoon, mikä tukee arvioitua sähkökuorma-autojen 85 % osuutta kuorma-autokannasta; ja
- 100-prosenttisesti uusiutuvan dieselin käyttö jäljelle jäävässä noin 15 % osassa sähköistämättömiä kuorma-autoja.

5.2 Elinkaarikustannukset

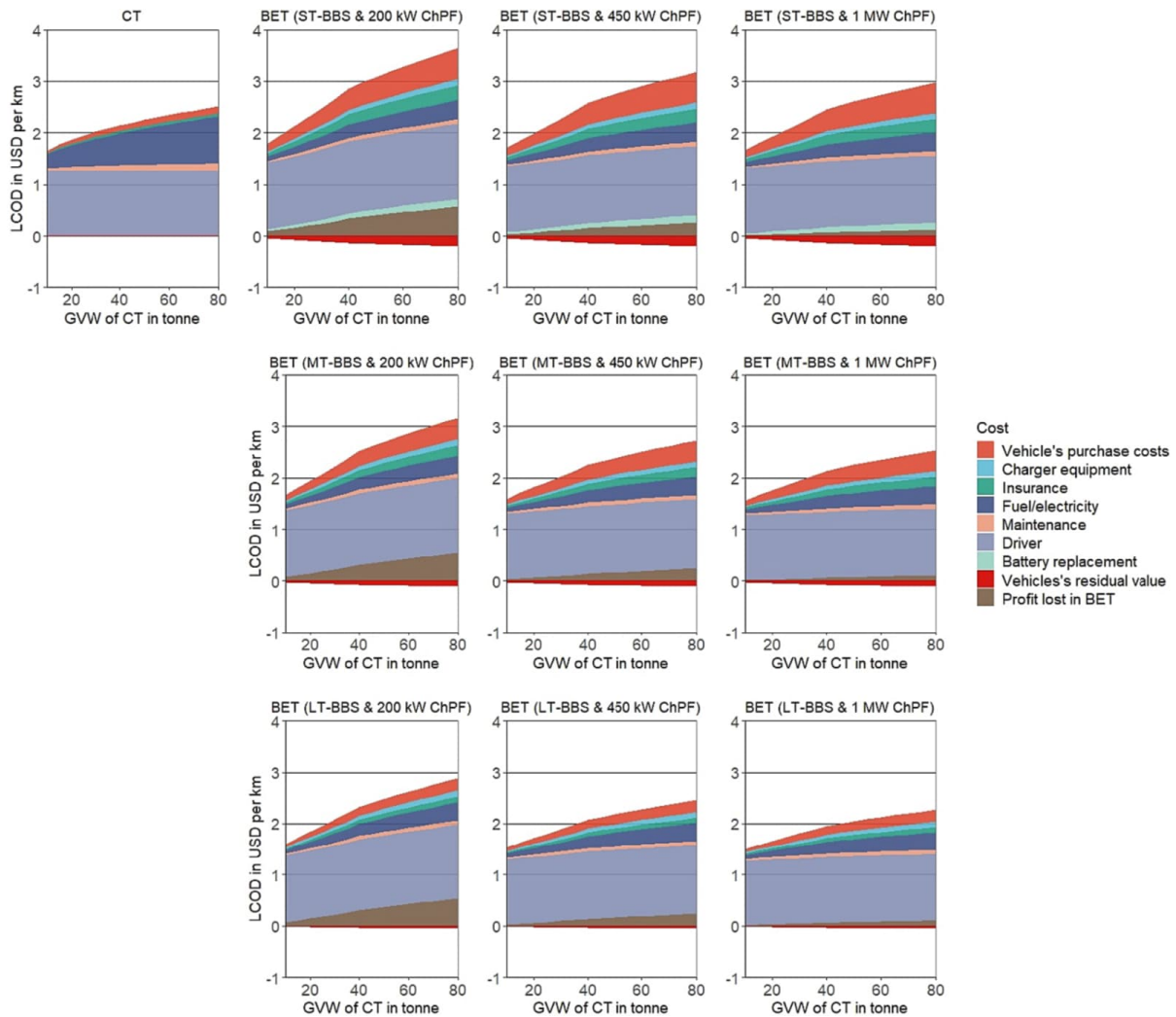
Tutkimuksessa toteutettu yksityiskohtainen parametrinen tasoitettujen ajokustannusten (LCOD, levelized cost of driving) analyysi parantaa vaihtoehtoisten käyttövoimien valintamallien tuloksia teknis-taloudellisissa arviointimalleissa. Analyysi antaa selkeän kuvan sähkökuorma-autojen toiminnan keskeisistä kustannuseristä, mikä auttaa ymmärtämään paremmin käyttöönoton mahdollisuuksia ja rajoituksia eri tapauksissa (esim. ajoprofiilit, akku- ja latausteknologian skenaariot).

Vertaileva LCOD-analyysi suoritettiin kolmelle eri suunnitteluhorisontille (lyhyt, keskipitkä, pitkä). Akun keskeiset ominaisuudet ovat hankintahinta, käyttökelpoinen lataustila, elinkaaren lataussykliin määrä, gravimetrinen energiatiheys. Akun ominaisuuksien lisäksi määriteltiin maksimilataustehot eri skenaarioissa.

Tämän tutkimuksen operatiivisia ajoprofiileja ovat sekamatkat (aggregoitu), kaupunkijakelu (U), lyhytmatkaiset kuljetukset (SH) ja pitkämatkaiset kuljetukset (LH). Nämä toiminnalliset matkaprofiilit erotettiin käyttämällä erilaisia oletuksia seuraaville parametreille: päivittäiset ajoneuvokilometrit, LCOD-analyysin aikaväli, vapaa ajonopeus maanteillä, ajonopeus kaduilla, ajoajan osuus maantienopeudella, lastaus-/purkutoiminnot kilometriä kohden, lainanmaksuvuosien kokonaismäärä ja lastaus-/purkuaika.

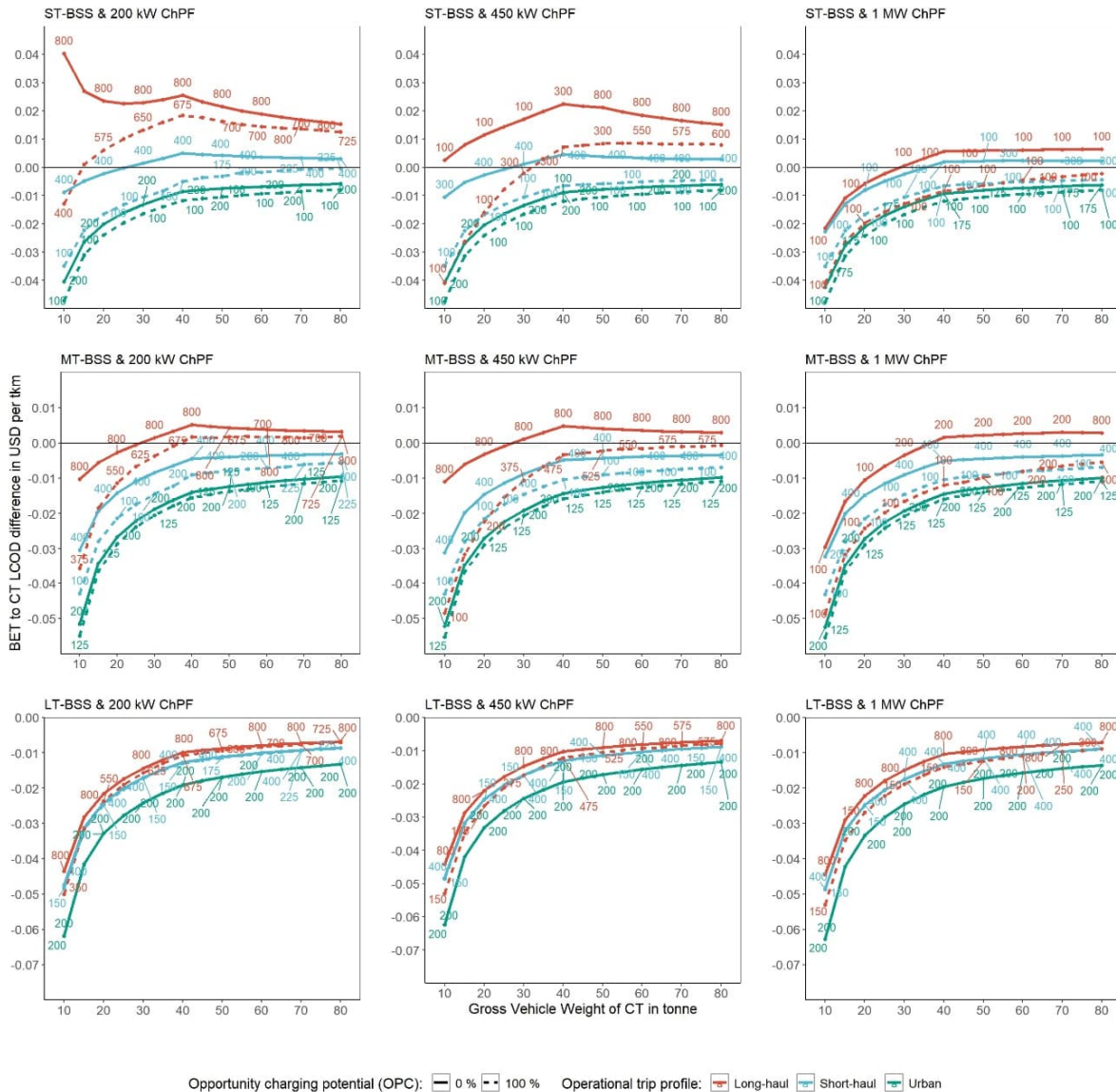
Tulokset (kuva 6) osoittavat, että kaupunkijakelussa sähkökuorma-autot voivat nykyisellä akkuteknologialla olla taloudellisesti kannattavia vaihtoehtoja dieselkuorma-autoille ilman politiikkatoimien apua. Kuitenkin pikalataustehon parantaminen (200 kW:sta 450 kW:iin tai 1 MW:iin) sekä latauksen mahdollistaminen lastaus-/purku- ja lepoaikana voivat osittain pienentää tarvittavaa akun kapasiteettia ja parantaa edelleen sähkökuorma-autojen kustannuskilpailukykyä.

Sähkökuorma-autojen kustannuskilpailukyky (kuva 6) alle 40-tonnisten kuorma-autojen kokoluokassa, ja pitkän aikavälin kehitys akkuteknologiassa on erittäin lupaava kaikissa pikalataustehon skenaarioissa (200 kW, 450 kW, 1 MW). Kuitenkin pitkämatkaisissa kuljetuksissa ankarissa sääolosuhteissa (esim. ympäristön lämpötila noin -15 °C) sähkökuorma-auto on edelleen haastava ja saattaa olla taloudellisesti mahdoton edes megawatin lataustehon avulla, mikä nostaa esiin tarpeen mahdollisille politiikkatoimille, kuten hankintatuille ja latausinfrastruktuurin investointituille.



Kuva 6. Diesel- ja sähkökuorma-autojen kustannusrakenne (LCOD USD/km) kokonaismassan funktiona yhdistetylle ajoprofiilille erilaisilla akku- ja latausteknologioilla.

Kuvasta 7 käy ilmi, että kustannustehokkaat tai optimaaliset ajomatkat kaupunkimatkailuilla eivät ole herkkiä pikalataustehon vaihteluille. Toiseksi akun koon määrittämisen pääparametrin tulisi olla päivittäin ajettu liikennesuorite. Kolmanneksi arvioitu optimaalinen ajomatka lyhyellä aikavälillä on lyhyempi kuin keskipitkällä ja pitkällä aikavälillä, mikä johtuu pääasiassa akun korkeammasta hinnasta lyhyellä aikavälillä. Neljänneksi mahdollisuus ladata lastaus-/purku- ja lepoaikana voi parantaa sähkökuorma-autojen kustannuskilpailukykyä lyhyen ja keskipitkän aikavälin akkuteknologianskenaarioissa.



Kuva 7. Optimaaliset akun kantamat ja sähkö- ja dieselkuorma-autojen LCOD-erot kilometriä kohden eri akku- ja latausskenaarioissa. Huom. 1) LCOD-erojen miinusarvot osoittavat alhaisemmat sähkökuorma-autojen elinkaarikustannukset. 2) Viivojen yläpuolella olevat tekstit edustavat optimaalisia akun kantamia.

Tulokset osoittavat, että politiikkatoimien toteuttaminen (esim. dieselpolttoaineen verotus, sähkön hinnan ja sähkökuorma-auton hankinnan tukeminen) sekä lautamahdollisuuksien lisääminen lastaus-/purku- ja lepoaikana (esim. tukemalla investointeja pikalatausasemiin) olisi tarpeen, jotta voidaan tukea yli 40 tonnin sähkökuorma-autoja lyhyen ja keskipitkän aikavälin akku- ja latausteknologian olosuhteissa.

5.3 Yhteiskuntataloudellinen kustannustehokkuus

Yhteiskuntataloudellisten vaikutusten laskenta on toteutettu käyttäen Liikenteen tutkimuskeskus Vernen aiemmin kehittämää HEETRA-laskentamallia (Liimatainen, et al. 2023). Mallin kehitystyön yhteydessä tehdyt tarkastelut vahvistivat yllä mainittujen

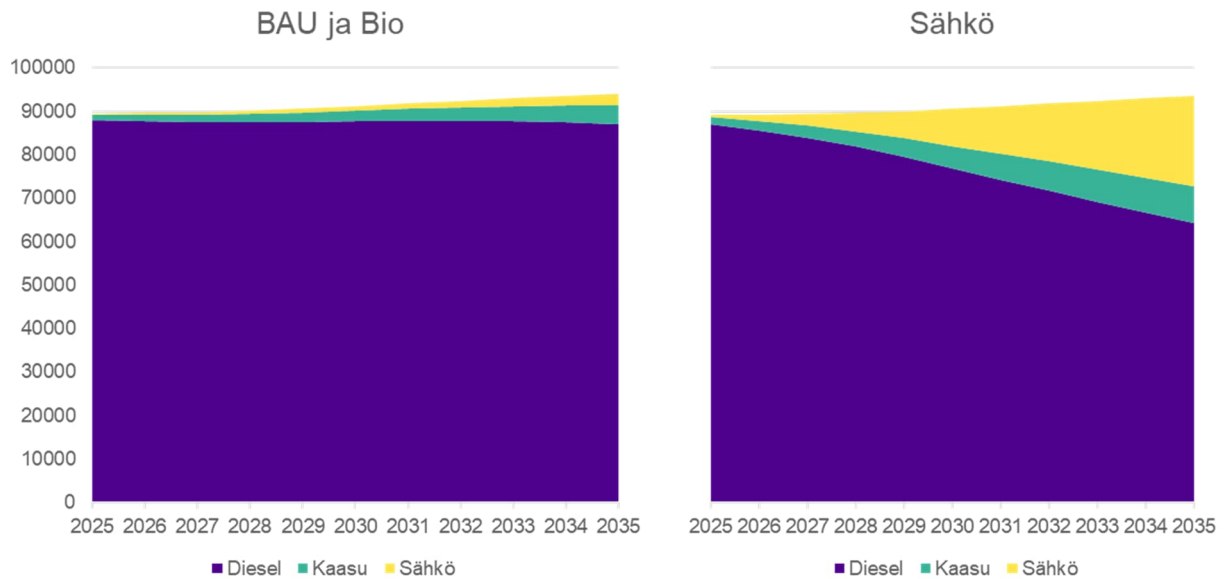
sähkökuorma-autojen hankintatukien kustannustehokkuudesta. HEETRA-mallissa sähkökuorma-autojen hankintahinnan on oletettu olevan 2,5-kertainen dieselkuorma-autoon verrattuna ja hankintahinnan eron on oletettu pysyvän samana koko laskentajakson 2025–2040 ajan. EU:n asettamat kuorma-autojen valmistajia sitovat CO₂-rajat (European Commission 2025) ja akkujen ennakoitu kustannusten pieneneminen (Link et al. 2024) kaventavat kuitenkin todennäköisesti hankintahintojen eroa.

Tutkimuksessa on laskettu yhteiskuntataloudelliset vaikutukset kolmessa skenaariossa. Kaikissa skenaarioissa tiekuljetussuorite (tkm) kasvaa noin 15 % talouskasvun myötä. BAU-skenaariossa ei saavuteta liikenteen päästövähennystavoitteita vuosina 2030 ja 2035, vaan päästöt pysyvät selkeästi korkeammalla tasolla. Sähkö-skenaariossa tavoitteet saavutetaan kuorma-autokannan erittäin nopean sähköistymisen, mutta myös kaasukuorma-autojen kannan kasvun avulla, jolloin uusiutuvien polttoaineiden jakeluvaihtoehto voidaan pitää nykylainsäädännön mukaisella tasolla vuoteen 2035 saakka. Bio-skenaariossa tavoitteet saavutetaan uusiutuvan dieselin käytön erittäin voimakkaan lisäämisen avulla. Uusiutuvan osuus kasvaa vuoteen 2035 mennessä jopa 71 %:iin dieselistä. Taulukossa 5 on esitetty eri käyttövoimien osuudet uusissa ja käytettyinä maahantuoduissa kuorma-autoissa.

Taulukko 5. Skenaarioiden oletukset eri käyttövoimien osuuksista uusissa ja käytettyinä maahantuoduissa kuorma-autoissa.

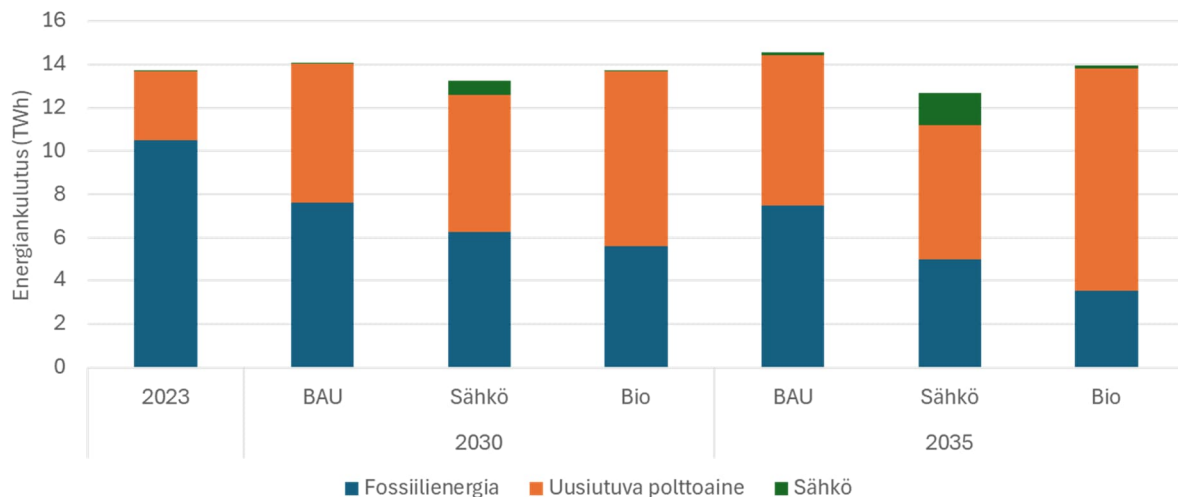
Skenaario	2025			2030		
Kuorma-autot	BEV	Kaasu	Diesel	BEV	Kaasu	Diesel
BAU / Bio	2,5 %	2,5 %	95 %	5 %	3 %	92 %
Sähkö	10 %	6 %	84 %	50 %	10 %	40 %
Perävaunulliset kuorma-autot						
BAU / Bio	0,5 %	6 %	93,5 %	1 %	10 %	89 %
Sähkö	7 %	8,5 %	84,5 %	25 %	25 %	50 %

Kuvassa 8 on esitetty yllä olevan mukaisilla osuuksilla lopputuloksena oleva kuorma-autokannan käyttövoimien kehitys. Sähkö-skenaariossa sähkökuorma-autoja on lähes 21 000 kappaletta vuonna 2035 ja kaasukuorma-autojakin yli 8 000, kun BAU- ja Bio-skenaarioissa kaasu- ja sähkökuorma-autoja on yhteensä noin 7 000 kappaletta.



Kuva 8. Kuorma-autokannan kehitys skenaarioissa.

Kuorma-autoliikenteessä energiankulutus nousee suoritteiden kasvun myötä BAU- ja Bio-skenaarioissa, mutta Sähkö-skenaariossa laskee hieman, koska sähkökuorma-autojen myötä energiatehokkuus paranee suoritteiden kasvua nopeammin. Myös Bio-skenaariossa kuorma-autojen energiatehokkuus paranee BAU-skenaariota enemmän, koska kallis diesel luo kannusteen parantaa energiatehokkuutta. Energiankulutuksen jakauma muuttuu kaikissa skenaarioissa siten, että uusiutuvan polttoaineen osuus kasvaa, mutta Sähkö-skenaariossa myös sähkön osuus kasvaa merkittäväksi, kuten kuvasta 9 nähdään.



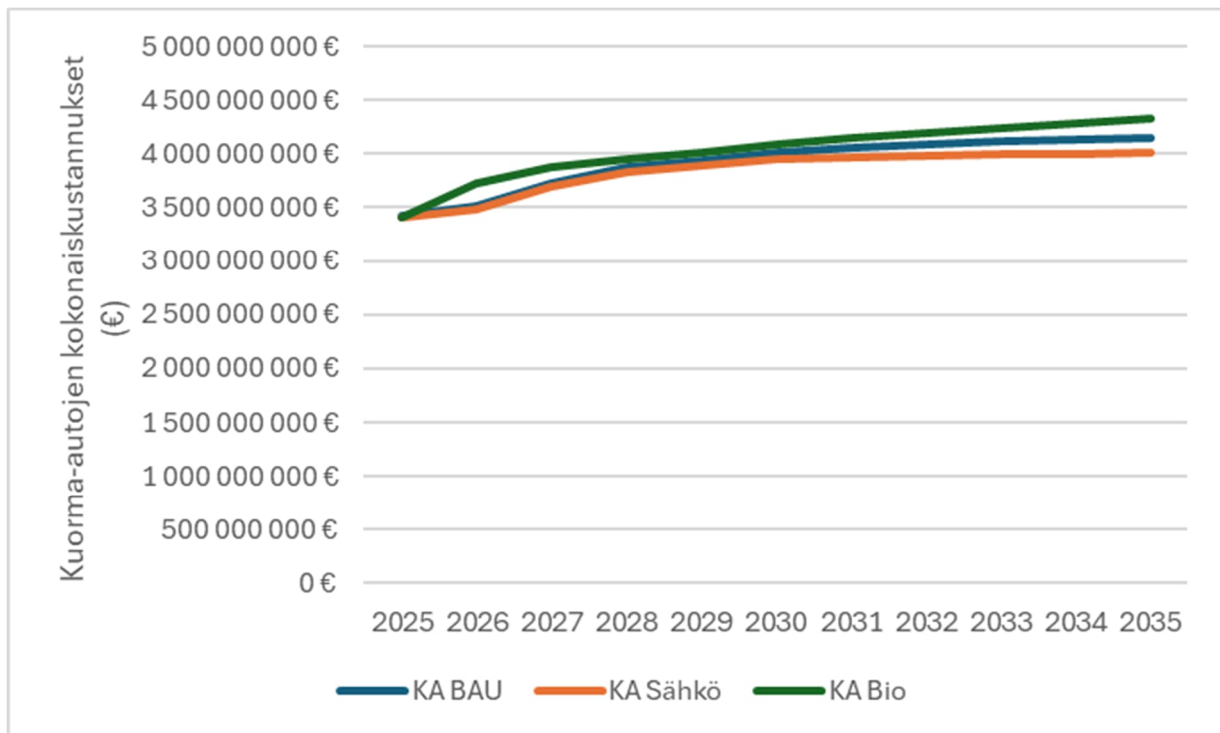
Kuva 9. Kuorma-autojen energiankulutuksen kehitys skenaarioissa.

Energiatehokkuuden ja uusiutuvan energian osuudet yhdessä käyttövoimien hankintahintojen eron kanssa määrittävät kuorma-autojen kokonaiskustannusten muutosta. Kuorma-autojen kokonaiskustannuksiin on laskettu mukaan

- verottomat energiakustannukset,

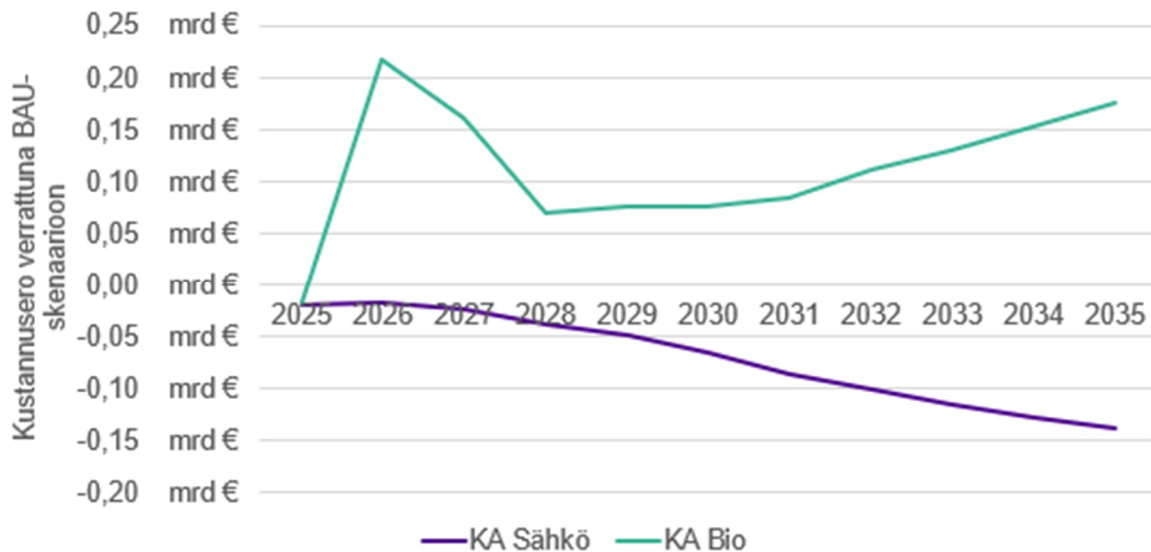
- arvonalenema,
- huoltokustannukset,
- energiaverot ja
- ajoneuvoverot.

Kuorma-autoliikenteen kustannukset kasvavat kaikissa skenaarioissa selvästi nykytilasta (kuva 10), koska uusiutuvaa dieseliä käytetään merkittävästi nykyistä enemmän, erityisesti Bio-skenaariossa. BAU-skenaariossa kustannukset kasvavat vuoteen 2035 mennessä 21 %. Sähköskenaariossa kustannukset kasvavat vuoteen 2035 mennessä 17 %. Bio-skenaariossa kustannukset kasvavat vuoteen 2035 mennessä 26 %. On huomattava, että laskennassa uusiutuvien polttoaineiden jakeluvelvoitteen nosto nostaa vain dieselin hintaa, mikä ei välttämättä vastaa todellisuutta, todellisuudessa Bio-skenaarion kustannusten nousu ei siten ole välttämättä näin suuri.



Kuva 10. Kuorma-autoliikenteen kokonaiskustannukset Suomessa eri skenaarioissa.

Kuorma-autoliikenteen kokonaiskustannukset siis laskevat Sähkö-skenaariossa koko laskenta-ajan verrattuna BAU-skenaarioon (kuva 11), jossa päästötavoitteita ei saavuteta, ja erityisesti verrattuna Bio-skenaarioon, jossa uusiutuvaa dieseliä tarvitaan suuri osuus, jotta päästötavoitteisiin päästään.



ku

Kuva 11. Kuorma-autoliikenteen kustannusero BAU-skenaarioon verrattuna Sähkö- ja Bio-skenaarioissa.

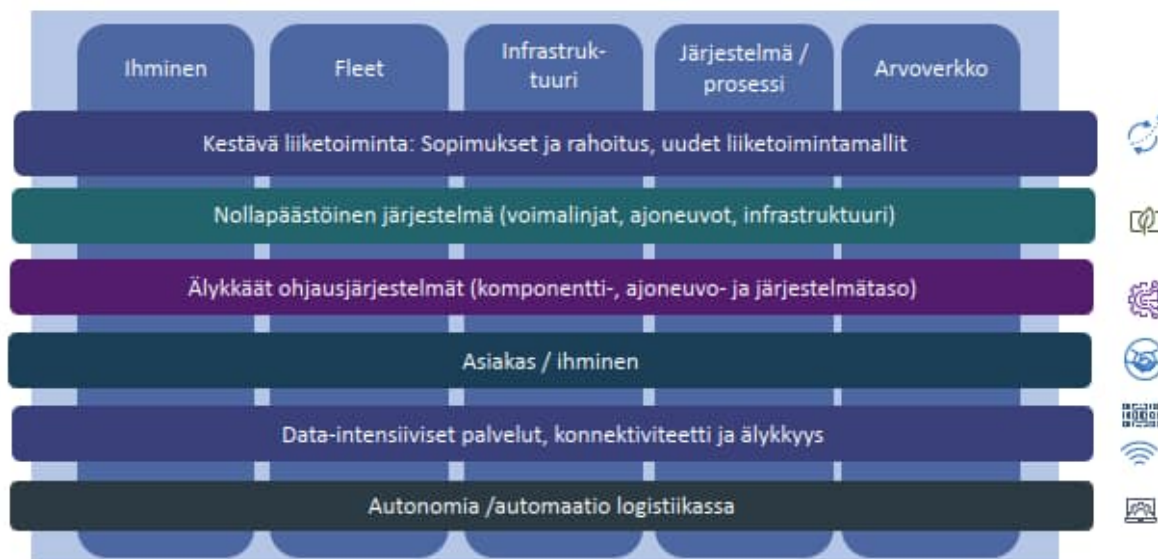
Sähkö-skenaariossa päästöt vähenevät BAU-skenaarioon verrattuna kumulatiivisesti 2025–2035 noin 4 Mt ja kustannukset vähenevät noin 790 milj. €, jolloin kustannustehokkuus on -199 €/t. Bio-skenaariossa vastaavasti päästöt vähenevät 7,2 Mt ja kustannukset kasvavat 1 230 milj. €, jolloin kustannustehokkuus on 172 €/t. Yhteiskuntataloudellista näkökulmasta sähkökuorma-autojen edistäminen on siis erittäin kannattavaa, vaikka hankintahinta olisi 2,5-kertainen diesel-kuorma-autoon nähden. Kannattavuutta parantaa edelleen sähkökuorma-autojen hankintahintojen todennäköinen aleneminen.

6. Raskaan sähköisen liikenteen tiekartta

Suomen kestävän raskaan tieliikenteen tiekartta esittää kestävän kehityksen ja uuden arvon mahdollistavia, logistiikkaan kytkeytyviä ratkaisuja tulevaisuuskuvan muodossa. Ratkaisuja ei listata vain mahdollistavina teknologioina, vaan tiekartta kuvaa toimijälähtöisesti sen, mitä tulevaisuuden logistiikalta ja logistiselta toimintaympäristöltä odotetaan ominaisuus-, toiminnallisuus- ja palvelumielessä tavoitevuoteen 2035 tultaessa.

Tiekartan sisältö pohjautuu teollisuusvetoisen innovaatioklusterin toimijoiden (SSAB, Kuljettava, Keulink, Posti, Rauanheimo, Plugit, Kempower, HSY, Elenia, Sisu-Auto, Volvo) muodostamaan tulevaisuuskuvaan ja vastaaviin tavoitteisiin. Lähtötiedot kerättiin ja koostettiin yritysکوhtaisissa haastatteluissa sekä yritysvetoisessa kattavassa työpajasarjassa 2023. Teollisuustoimijoiden muodostaman teemoitetun tiekartan avulla tutkimustahot (Tampereen Yliopisto, VTT) rakensivat tavoitekuvaa vasten tutkimusosion, sisältäen teknologioita ja tutkimusaiheita, joiden avulla määritetty tulevaisuuskuva voi toteutua. Yhteenliittymän ja ympäristön toimijoiden yhteistyössä muodostuu yhteisten aktiviteettien jatkumo, jonka turvin teollisuuden asettamiin tavoitteisiin päästään.

Tiekartan teema-alueet (kuva 12) muodostavat isossa kuvassa ratkaisun avaimia tunnistettuihin toimintaympäristön haasteisiin. Kullekin teema-alueelle on yritysten näkökulmasta muodostettu oma visio sekä tulevaisuuden tavoitetilaa valottava tiekarttasisältö. Myös muutosta nykyhetkestä tulevaisuuteen välitavoitteineen on tarvittavilta osin kuvattu.



Kuva 12. Raskaan sähköisen liikenteen tiekartan teema-alueet.

Tiekartan yhteinen visio on, että ”Vuonna 2035 Suomen raskas tieliikenne on kestävä (people, profit, planet) ja näyttää tietä myös globaalilla tasolla. Se mahdollistaa täysin uuden arvon muodostumisen yli koko arvoverkon.”

Lähteet

Abhyankar, N., Gopinathan, N., Khandekar, A., Karali, N., Phadke, A. A., & Rajagopal, D. (2022). *Freight Trucks in India are Primed for Electrification*.

Anderhofstadt, B., & Spinler, S. (2019). Factors affecting the purchasing decision and operation of alternative fuel-powered heavy-duty trucks in Germany – A Delphi study. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 73, 87–107. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2019.06.003>

ASTRA 2.0. (2023). <http://www.astra-model.eu/>

Baral, N. R., Asher, Z. D., Trinko, D., Sproul, E., Quiroz-Arita, C., Quinn, J. C., & Bradley, T. H. (2021). Biomass feedstock transport using fuel cell and battery electric trucks improves lifecycle metrics of biofuel sustainability and economy. *Journal of Cleaner Production*, 279, 123593. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123593>

Bernard, A., Frolking, C., Marshall, R., & Ang-Olson, J. (2025). *Battery Swapping for Truck Electrification in the United States*. ACEEE Topic Brief. American Council for an Energy-Efficient Economy. <https://www.aceee.org>

Burnham, A., Gohlke, D., Rush, L., Stephens, T., Zhou, Y., Delucchi, M. A., Birky, A., Hunter, C., Lin, Z., Ou, S., Xie, F., Proctor, C., Wiryadinata, S., Liu, N., & Boloor, M. (2021). *Comprehensive Total Cost of Ownership Quantification for Vehicles with Different Size Classes and Powertrains*. Argonne National Laboratory Argonne. <https://www.osti.gov/biblio/1780970%0Ahttps://www.osti.gov/servlets/purl/1780970>

Burul, D., & Algsten, D. (2021). Battery electric vs diesel driven. *Own Report Scania*. <https://www.scania.com/group/en/home/newsroom/press-releases/press-release-detail-page.html/3999115-scania-publishes-life-cycle-assessment-of-battery-electric-vehicles>

Elinkeinoelämän keskusliitto, (2022). Elinkeinoelämän liikenneohjelma 2023-2027: Liikenneinfrausta Suomen vihreän kasvun alusta. Saatavilla: https://ek.fi/wp-content/uploads/2022/11/EK_Liikenneohjelma_2023.pdf

Enedis SA, TotalEnergies, VINCI Autoroutes, Iveco, MAN Truck, Mercedes-Benz Trucks, Renault Trucks, Scania Trucks, & Volvo Trucks. (2024). *Electrification of the long-distance heavy duty vehicle fleet. On-highway charging needs and challenges (France)* (p. 31). TotalEnergies. https://totalenergies.com/sites/g/files/nytnzq121/files/documents/2024-06/totalenergies_etude-mobilite-poids-lourds_en_pdf.pdf

European Commission 2025. Heavy-duty vehicles. https://climate.ec.europa.eu/eu-action/transport-decarbonisation/road-transport/heavy-duty-vehicles_en

Fulton, L., Cazzola, P., & Cuenot, F. (2009). IEA Mobility Model (MoMo) and its use in the ETP 2008. *Energy Policy*, 37(10), 3758–3768. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.07.065>

Ghandriz, T., Jacobson, B., Laine, L., & Hellgren, J. (2020). Impact of automated driving systems on road freight transport and electrified propulsion of heavy vehicles. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 115(August 2018). <https://doi.org/10.1016/j.trc.2020.102610>

Gillström, H., 2024. Barriers and enablers: How logistics companies could tackle the transition to electrified road freight transport. *Cleaner Logistics and Supply Chain* 13, 100172. <https://doi.org/10.1016/j.clscn.2024.100172>

González Palencia, J. C., Nguyen, V. T., Araki, M., & Shiga, S. (2020). The role of powertrain electrification in achieving deep decarbonization in road freight transport. *Energies*, 13(10), 1–24. <https://doi.org/10.3390/en13102459>

Hao, X., Ou, S., Lin, Z., He, X., Bouchard, J., Wang, H., & Li, L. (2022). Evaluating the current perceived cost of ownership for buses and trucks in China. *Energy*, 254, 124383. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124383>

Hao, H., Wang, L., & Li, J. (2025). A two-layer programming approach for highway heavy-duty truck battery swapping station planning. *Energy*, 310, 130623. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.130623>

Hill, N., Amaral, S., Morgan-Price, S., Nokes, T., Bates, J., Helms, H., Fehrenbach, H., Biemann, K., Abdalla, N., Jöhrens, J., Cotton, E., German, L., Harris, A., Haye, S., Sim, C., Bauen, A., & Ziem-Milojevic, S. (2020). *Determining the environmental impacts of conventional and alternatively fuelled vehicles through LCA - Interim Report* (pp. 1–456). <https://doi.org/10.2834/91418>

IEA (2025), Global EV Outlook 2025, IEA, Pariisi. Saatavilla: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2025>

likkanen, P., (2004). Toimialojen kuljetusintensiteetit. Liikenne- ja viestintäministeriön julkaisu 26/2004. Saatavilla: https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/78552/1_26_2004.pdf?sequence=1

ITF, (2019a). Permissible maximum dimensions of lorries in Europe (in metres). Saatavilla: <https://www.itf-oecd.org/sites/default/files/docs/dimensions-2019.pdf>

ITF, (2019b). Permissible maximum weights of lorries in Europe (in tonnes). Saatavilla: <https://www.itf-oecd.org/sites/default/files/docs/weights-2019.pdf>

ITF. (2022). Decarbonising Europe's Trucks, How to Minimise Cost Uncertainty. In *International Transport Forum Policy Papers, No. 107, OECD Publishing* (p. 145). ITF.

- Karlsson, J., Grauers, A., 2023b. Energy Distribution Diagram Used for Cost-Effective Battery Sizing of Electric Trucks. *Energies* 16, 779. <https://doi.org/10.3390/en16020779>
- Lee, D. Y., & Thomas, V. M. (2017). Parametric modeling approach for economic and environmental life cycle assessment of medium-duty truck electrification. *Journal of Cleaner Production*, 142, 3300–3321. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.139>
- Li, Y., Zhang, H., Liu, Y., & Wang, S. (2024). Electrifying heavy-duty truck through battery swapping. *Joule*, 8(6), 1556–1561. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2024.04.008>
- Liimatainen, H., Viri, Riku, Tiikkaja, Hanne, & Utriainen, Roni. (2023). *Holistic Economic Evaluation of Transport Emission Reduction Measures (HEETRA)*. <https://valtioneuvosto.fi/en/-/report-new-tools-for-evaluating-emissions-reduction-measures-in-transport>
- Link, S., Stephan, A., Speth, D., & Plötz, P. (2024). Rapidly declining costs of truck batteries and fuel cells enable large-scale road freight electrification. *Nature Energy*, 9(8), 1032–1039. <https://doi.org/10.1038/s41560-024-01531-9>
- Mauler, L., Dahrendorf, L., Duffner, F., Winter, M., & Leker, J. (2022). Cost-effective technology choice in a decarbonized and diversified long-haul truck transportation sector: A U.S. case study. *Journal of Energy Storage*, 46, 103891. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103891>
- Moon, S., & Lee, D.-J. (2019). An optimal electric vehicle investment model for consumers using total cost of ownership: A real option approach. *Applied Energy*, 253, 113494. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113494>
- Mulholland, E., Teter, J., Cazzola, P., McDonald, Z., & Ó Gallachóir, B. P. (2018). The long haul towards decarbonising road freight – A global assessment to 2050. *Applied Energy*, 216(February), 678–693. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.01.058>
- Mäntynen, J., Rantala, T., Autero, V., Metsäpuro, P., Isola, R., Kärkinen, T., (2017). Elinkeinoelämän kuljetukset tieverkolla - volyymi- ja arvoanalyysi. WSP Finland Oy. Saatavilla: https://ek.fi/wp-content/uploads/Elinkeinoelaman-kuljetukset-tieverkolla_volyymija-arvoanalyysi_WSP-Finland.pdf
- Mäntynen, J., Huhta, R., Pajarre, M., Virtala, P., (2022). Modernit pääväylät – kilpailukykyinen Suomi. Saatavilla: https://ek.fi/wp-content/uploads/2022/10/Modernit_paavaylat_kilpailukykyinen_Suomi_loppuraportti_09_2022.pdf
- Noto, F., Marczewski, A., Erdmann, M., & Danilovic, M. (2023). Acceptance analysis of electric heavy trucks and battery swapping stations in the German market. *Systems*, 11(9), 441. <https://doi.org/10.3390/systems11090441>

Nykvist, B., & Olsson, O. (2021). The feasibility of heavy battery electric trucks. *Joule*, 5(4), 901–913. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2021.03.007>

Phadke, A., Khandekar, A., Abhyankar, N., Wooley, D., & Rajagopal, D. (2021). *Why regional and long-haul trucks are primed for electrification now*. Lawrence Berkeley National Lab.(LBNL), Berkeley, CA (United States). <https://www.osti.gov/biblio/1834571>

Pöllänen, M., Mäkelä, T., Nykänen, L., Liimatainen, H., Mäntynen, J., (2015). Liikenteen markkinat Suomessa. Trafin tutkimuksia 16/2015. Saatavilla: https://www.traficom.fi/sites/default/files/19497-Liikennemarkkinat_raportti_2015-12-10.pdf

Ritvanen, V., Inkiläinen, A., von Bell, A., Santala, J., Relander, S., (2011). Logistiikan ja toimitusketjun hallinnan perusteet. Suomen huolintaliikkeiden liitto, Helsinki. Saatavilla: https://www.logistiikanmaailma.fi/wp-content/uploads/2018/06/Logistiikan_ja_toimitusketjun_hallinnan_perusteet.pdf

Robinson, B. (2023). *HGVs on the road to net zero-How battery electric trucks can decarbonise GB road freight Summary*. https://www.transportenvironment.org/uploads/files/2023_05_TE_study_summary_HGVs_road_net_zero.pdf

Sen, B., Ercan, T., & Tatari, O. (2017). Does a battery-electric truck make a difference? – Life cycle emissions, costs, and externality analysis of alternative fuel-powered Class 8 heavy-duty trucks in the United States. *Journal of Cleaner Production*, 141(2017), 110–121. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.09.046>

Shi, P., Ni, G., Jin, R., Wang, H., Wang, J., & Chen, X. (2025). Economic operation optimization for electric heavy-duty truck battery swapping stations considering time-of-use pricing. *Processes*, 13(7), 2271. <https://doi.org/10.3390/pr13072271>

SKAL, (2021). Maanteiden tavaraliikenne Suomessa. Saatavilla: https://skal.fi/wp-content/uploads/2023/03/SKAL_toimialakatsaus_2021.pdf

Solakivi, T., Ojala, L., Laari, S., Töyli, J., Toivonen, N., Metsäaho, V., (2023). Logistiikkaselvitys 2023. Turun kauppakorkeakoulun julkaisuja E-5:2023. Saatavilla: <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-249-647-8>

Sundberg, P., (2009). Suomen kaupan ja teollisuuden rakenne kuljetusten näkökulmasta. Turun yliopiston merenkulkualan koulutus- ja tutkimuskeskuksen julkaisuja B 163. Saatavilla: https://www.utu.fi/sites/default/files/media/MKK/B163_Suomen_kaupan_ja_teollisuuden.pdf

- Suomen virallinen tilasto (SVT), (2024). Tieliikenteen tavarankuljetukset [verkkojulkaisu]. ISSN=1798-2995 Tilastokeskus. Saatavilla: <https://stat.fi/julkaisu/cm0qi0e2j7jtt07uodcakwsrv>
- Tilastokeskus 2025. Moottoriajoneuvojen ensirekisteröinnit -tilasto. Moottoriajoneuvokanta -tilasto. <https://stat.fi/aihe/liikenne-ja-matkailu>
- Tol, D., Frateur, T., Verbeek, M., Riemersma, I., & Mulder, H. (2022). *Techno-economic uptake potential of zero-emission trucks in Europe*. Tech. rep.
- Traficom, (2024a). Tavaraliikenne Suomessa. Saatavilla: <https://tieto.traficom.fi/fi/tilastot/tavaraliikenne-suomessa>
- Traficom, (2025a). Kuljetusmuotojen roolit tavaraliikenteessä. Saatavilla: <https://tieto.traficom.fi/fi/tilastot/kuljetusmuotojen-roolit-tavaraliikenteessa?toggle=L%C3%A4hteet%20ja%20lis%C3%A4tiedot>
- Traficom, (2025b). Liikennekäytössä olevat kuorma-autot - käyttövoimat ja päästöt. Saatavilla: <https://tieto.traficom.fi/fi/tilastot/liikennekaytossa-olevat-kuorma-autot-kayttovoimat-ja-paastot>
- Vijayagopal, R., & Rousseau, A. (2021). Electric Truck Economic Feasibility Analysis. *World Electric Vehicle Journal*, 12(2). <https://doi.org/10.3390/wevj12020075>
- Wang, R., Martinez, A., Allybokus, Z., Zeng, W., Obrecht, N., & Moura, S. (2025). Electrifying heavy-duty trucks: Battery-swapping vs fast charging. *arXiv preprint arXiv:2503.08080*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2503.08080>
- Wolff, S., Seidenfus, M., Gordon, K., Álvarez, S., Kalt, S., & Lienkamp, M. (2020). Scalable life-cycle inventory for heavy-duty vehicle production. *Sustainability (Switzerland)*, 12(13). <https://doi.org/10.3390/su12135396>
- Wu, X., Liu, P., & Lu, X. (2021). Study on operating cost economy of battery-swapping heavy-duty truck in China. *World Electric Vehicle Journal*, 12(3), 144. <https://doi.org/10.3390/wevj12030144>
- Zhao, Y., Ercan, T., & Tatari, O. (2016). Life cycle based multi-criteria optimization for optimal allocation of commercial delivery truck fleet in the United States. *Sustainable Production and Consumption*, 8(June), 18–31. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2016.04.003>
- Zhao, Y., Onat, N. C., Kucukvar, M., & Tatari, O. (2016). Carbon and energy footprints of electric delivery trucks: A hybrid multi-regional input-output life cycle assessment. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 47, 195–207. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2016.05.014>

Zhao, Y., & Tatari, O. (2017). Carbon and energy footprints of refuse collection trucks: A hybrid life cycle evaluation. *Sustainable Production and Consumption*, 12(March), 180–192. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2017.07.005>

Zhao, P., Zhang, S., Santi, P., Cui, D., Wang, F., Liu, P., Zhang, Z., Liu, J., Wang, Z., Ratti, C., Wu, Y., (2024). Challenges and opportunities in truck electrification revealed by big operational data. *Nature Energy* 9, 1427-1437. Saatavilla: <https://doi.org/10.1038/s41560-024-01602-x>

Zhou, T., Roorda, M. J., MacLean, H. L., & Luk, J. (2017). Life cycle GHG emissions and lifetime costs of medium-duty diesel and battery electric trucks in Toronto, Canada. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 55, 91–98. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.06.019>

Liite 1 Hankkeen perustiedot

a. Hankkeen nimi, kesto ja toteuttajat

Sustainable industry X - Heavy on-road vehicles ecosystem (SIX HOVE), 1.1.2023-30.9.2025, Tampereen yliopisto

b. Hankkeen tausta ja tavoitteet

Suomen tavoite on olla hiilineutraali yhteiskunta vuoteen 2035 mennessä ja tähän tavoitteeseen pääsemisen on fossiilittoman liikenteen tiekartassa nähty edellyttävän liikenteen päästöjen puolittamista 2030 mennessä ja poistamista kokonaan 2045 mennessä. Tieliikenteen päästöistä noin kolmannes aiheutuu kuorma-autoista ja kuorma-autojen päästöjen ennakoidaan perusennusteessa pienenevän vain 25 % vuoteen 2030 mennessä ja 31 % vuoteen 2045 mennessä, joten uusia toimenpiteitä kuorma-autojen päästöjen vähentämiseksi tarvitaan nopeasti.

Tutkimuksen tavoitteena on tuottaa valikoima suosituksia kuorma-autojen sähköistämisen edistämisestä Suomessa. Hanke vertailee eri toteutusvaihtoehtojen elinkaaripäästöjä ja -taloutta kuljetus-, sähköverkko- ja energiayhtiöiden sekä yhteiskunnan kannalta.

c. Hankkeen kuvaus

Tampereen yliopisto (Liikenteen tutkimuskeskus Verne) on osallistunut VTT:tä tukien tiekartan rakentamiseen liittyviin innovaatioklusterin työpajoihin, ja kirjoittanut raskaan sähköisen liikenteen tiekarttaraporttia VTT:n kanssa. Hankkeessa on kehitetty optimointimalli, jolla on tehty analyysi sähkökuorma-autojen tarvitsemasta latausinfrastruktuurista terminaalilatauksen ja julkisen latauksen osalta. Tieliikenteen tavarankuljetustilaston datan pohjalta Suomen tiekuljetukset on jaettu tieverkolle ja energiankulutusmallin avulla on muodostettu kuva sähkökuorma-autojen latausenergian tarpeesta koko Suomessa 10kmx10km -ruuduissa. Tämän pohjalta on laadittu suosituksia latauspisteiden sijoittelusta ja tehontarpeesta, ottaen huomioon sähköautojen määrien kehitysskenaariot. Sähköistymisen skenaarioiden pohjalta on myös tehty analyysi kuorma-autojen päästövähennysten yhteiskuntataloudellisesta tehokkuudesta. Kuorma-autojen käyttöprofiilien vaikutusta sähköistyksen potentiaaliin on tarkasteltu Tieliikenteen tavarankuljetustilaston analyysillä sekä haastattelututkimuksella. Käyttöprofiilit voivat vaikeuttaa suurteholataukseen perustuvaa sähköistystä, joten vaihtoehtoisena teknologiana on analysoitu akunvaihtoteknologian mahdollisuuksia kirjallisuustutkimuksen ja haastattelututkimuksen avulla.

d. Hankkeen keskeiset toimenpiteet ja sidosryhmät

Kirjallisuustutkimukset, sidosryhmien (kuljetusyritykset, teollisuusyritykset, ajoneuvovalmistajat, latauslaitteiden valmistajat, julkisen sektorin edustajat, tutkijat) haastattelututkimukset, mallinnus, elinkaaripäästöjen ja -kustannusten analyysi.

e. Onnistumiset ja positiiviset havainnot sekä eteen tulleet haasteet

Tuensaajalle on syntynyt uutta tietoa ja osaamista kuljetusten mallinnuksesta sekä elinkaaripäästöjen ja -kustannusten laskennasta. Kehitettyjä mallinnustyökaluja voidaan hyödyntää tulevilla tutkimuksilla. Innovaatioklusterin toiminnan myötä on havaittu tärkeitä tutkimuksen ja toimialan kehityksen tarpeita. Toteutuksen merkittävänä haasteena on ollut sähkökuorma-autojen ja latausteknologian nopea kehitys, jonka vuoksi analyysin tulokset voivat vanhentua hyvin nopeasti. Joitain työvaiheita lykättiin tämän välttämiseksi, mutta kaikki suunnitellut työvaiheet toteutettiin.

f. Hankkeen tulokset ja tulosten hyödyntäminen

Hankkeen tuloksena on julkaistu useita tieteellisiä artikkeleja, joita on esitelty hankkeen seminaareissa ja kansainvälisissä tutkimuskonferensseissa sekä hyödynnetty aiheeseen liittyvässä opetuksessa yliopistossa.

g. Keskeiset viestintätoimenpiteet

Hankkeessa järjestettiin vuosiseminaarit 2023, 2024 sekä huhtikuussa ja syyskuussa 2025, kaikkiin seminaareihin osallistui yli 100 henkilöä.

h. Hankkeen vaikuttavuus ja sen mittaaminen

Vaikuttavuus on toteutunut suunniteltua laajemmin hyvin suosittujen seminaarien kautta. Innovaatioklusterin toimintaan on saatu suunnitellusti sidosryhmiä, ja tiekarttaraportin vaikuttavuus on suunniteltua parempi, koska Business Finland julkaisi raportin. Muiden projektien (HEETRA, Sähköinen liikenne ry., Suomen Ilmastopaneeli) kanssa tehdyn yhteistyön kautta vaikuttavuus on ollut suunniteltua laajempaa. Hankkeen seminaarien osallistujamäärä on ollut suuri.

i. Arvion DNSH-periaatteen toteutumisesta hankkeessa

Mitkä seuraavista ympäristötavoitteista edellyttävät toimenpiteen yksityiskohtaista haaita-arviointia?

Ympäristötavoitteet	Kyllä	Ei	Perustelu, jos on valittu "Ei"
a Ilmastomuutoksen hillitseminen		X	toiminta pyrkii vähentämään nykyisen logistiikkajärjestelmä haittoja
b Ilmastomuutokseen sopeutuminen		X	toiminta pyrkii vähentämään nykyisen logistiikkajärjestelmä haittoja
c Vesivarojen ja merten luonnonvarojen kestävä käyttö ja suojelu		X	toiminta pyrkii vähentämään nykyisen logistiikkajärjestelmä haittoja
d Kiertotalous, mukaan lukien jätteen synnyn ehkäisy ja kierrätys		X	toiminta pyrkii vähentämään nykyisen logistiikkajärjestelmä haittoja
e Ilman, veden ja maaperän pilaantumisen ehkäiseminen ja vähentäminen		X	toiminta pyrkii vähentämään nykyisen logistiikkajärjestelmä haittoja
f Biologisen monimuotoisuuden ja ekosysteemin suojelu ja ennallistaminen		X	toiminta pyrkii vähentämään nykyisen logistiikkajärjestelmä haittoja