



**TURUN
YLIOPISTO**

Kauppakorkeakoulu

RASKAAN LIIKENTEEEN KÄYTTÖVOIMIEN ELINKAARIKUSTANNUKSET JA KÄYTTÖ- POTENTIAALI SUOMESSA

Toimitusketjujen johtamisen
pro gradu -tutkielma

Laatija:

Riku Levälehto

Ohjaajat:

KTT Tomi Solakivi

KTT Sini Laari

20.8.2025

Turku

Turun yliopiston laatu järjestelmän mukaisesti tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck -järjestelmällä.

Pro gradu -tutkielma

Oppiaine: Toimitusketjujen johtaminen

Tekijä: Riku Levälehto

Otsikko: Raskaan liikenteen käyttövoimien elinkaarikustannukset ja käyttöpotentiaali Suomessa

Ohjaajat: KTT Tomi Solakivi ja KTT Sini Laari

Sivumäärä: 169 sivua

Päivämäärä: 20.8.2025

Ilmastonmuutos on yksi ihmiskunnan merkittävimmistä haasteista, ja hiilidioksidi ylivoimaisesti suurin kasvihuonepäästöjen lähde Euroopassa. Vaikka Euroopan unioni on tämän vuosituhannen aikana onnistunut energiapolitiikallaan laskemaan merkittävästi kokonaispäästöjään, liikenteen päästöt ovat kuitenkin samanaikaisesti kasvaneet huomattavasti. Liikenteestä aiheutuukin lähes 30 prosenttia kaikista Euroopan unionin päästöistä ja tieliikenteen päästöistä yli neljännes syntyy raskaasta liikenteestä, joka koostuu pääosin kuorma-autoliikenteestä.

Päästöjen vähentäminen raskaasta liikenteestä on osoittautunut haasteelliseksi, sillä erityisesti kuorma-autoliikenne nojaa edelleen vahvasti dieselkäyttöisiin ajoneuvoihin. Euroopan unioni on kuitenkin asettanut tavoitteekseen vähentää syntyvät kasvihuonepäästöt nollassa vuoteen 2050 mennessä, mikä edellyttää myös tieliikenteen siirtymistä fossiilisista polttoaineista vaihtoehtoihin käyttövoimiin.

Tässä tutkielmassa tarkastellaan dieselin ja vaihtoehtoista käyttövoimista HVO-dieselin, biometaanin, sähkön ja vedyllä toimien polttonoajoneuvojen elinkaarikustannuksia ja käyttöpotentiaalia Suomessa. Suomen raskaassa liikenteessä on käytössä muuta Eurooppaa suuremmat kokonaisuudet, mikä tuo kylmien talviolosuhteiden ohella vaihtoehtoisten käyttövoimien hyödyntämiseen erityiset haasteensa.

Tutkimuksessa on tarkasteltu Suomessa tieliikenteessä yleisesti käytettävien puoliperävaunu-, täysperävaunu- ja HCT-yhdistelmien kustannuksia elinkaarikustannusmallin avulla. Mallissa tarkastellaan ajoneuvon hankinnasta ja käytöstä syntyviä kustannuksia ajoneuvon kymmenen vuoden elinkaaren aikana. Käytöstä syntyvien kustannusten laskenta nojaa Euroopan komission kehittämän VECTO-simulaatiotyökalun avulla tehtyihin laskelmiin ajoneuvojen polttoaineenkulutuksesta. Koska erityisesti sähköisten akkukäyttöisten ajoneuvojen toimintasäde voi tuoda rajoitteen ajoneuvojen käytölle, on tutkielmassa tarkasteltu kustannusten lisäksi eri käyttövoimien potentiaalia suoriutua eri kokoisilta ajoneuvoilta edellytettävistä päivittäisistä kilometrisuoritteista. Sekä elinkaarikustannusten laskennassa että ajoneuvojen käyttöpotentiaalin vertailussa on otettu huomioon talvien olosuhteiden vaikutus ajoneuvojen polttoaineen kulutukseen.

Tutkimuksen tulokset osoittavat, että biometaanilla saavutetaan alhaisimmat kustannukset kaikilla ajoneuvotyypeillä. Akkukäyttöisten sähköajoneuvojen kustannukset ovat lähellä biometaanijoneuvojen kustannuksia erityisesti puoliperävaunuyhdistelmissä, ja niillä saavutetaan kaikkien ajoneuvotyyppien osalta dieseliä ja HVO-dieseliä alhaisemmat elinkaarikustannukset. Ajoneuvo- ja polttoainekustannusten herkkyystarkastelut kuitenkin osoittavat, että varsinkin muutokset polttoaineiden hinnoissa voivat vaikuttaa merkittävästi toteutuviin kokonaiskustannuksiin.

Käyttövoimien potentiaalin vertailu puolestaan osoittaa, että sähköä voidaan jo nykytilanteessa hyödyntää puoliperävaunuyhdistelmien käyttövoimana, mikäli akkua ladataan työpäivän aikana EU:n lainsäädännön edellyttämän 45 minuutin lepotauon ajan. Täysperävaunuyhdistelmissä sähkön käyttö sen sijaan edellyttää 1 megawatin pikalatausinfrastruktuurin kehittämistä, kun taas HCT-yhdistelmissä sähkön käyttö aiheuttaa liikennöinnille merkittäviä rajoitteita.

Avainsanat: raskas liikenne, vihreä liikenne, päästöjen vähentäminen, vaihtoehtoiset käyttövoimat, elinkaarikustannukset, kustannusvertailu, käyttöpotentiaali, VECTO

SISÄLLYS

1	Johdanto	9
1.1	Johdatus aiheeseen	9
1.1.1	Ilmastonmuutos	9
1.1.2	Vihreä muutos liikenteessä	10
1.2	Tutkimuksen aihe ja tutkimuskysymykset	10
1.3	Tutkimuksen rakenne	12
2	Liikenteen päästöt ja sääntely päästöjen vähentämiseksi	14
2.1	Liikenteen rooli päästöjen lähteenä	14
2.2	Liikenteestä syntyvien päästöjen arviointi	15
2.3	EU:n liikennettä ohjaavat päästötavoitteet ja säädökset	18
2.3.1	Uusiutuvan energian direktiivi ja White Paper 2011: Roadmap	18
2.3.2	Uusiutuvan energian direktiivi II ja Euroopan vihreän kehityksen ohjelma	18
2.3.3	Uusiutuvan energian direktiivi III ja ETS2	19
2.4	EU:n raskasta liikennettä ohjaavat päästötavoitteet ja säädökset	20
2.4.1	Euro-päästöluokitus	21
2.4.2	Direktiivit 2019/1242 ja 2024/1610 hiilidioksidipäästöjen vähentämiseksi	22
2.5	Raskaiden ajoneuvojen päästöluokittelu	23
2.6	Uusiutuvien polttoaineiden päästöluokittelu	24
3	Raskaan tavaraliikenteen siirtymä vähäpäästöisiin kuljetuksiin	26
3.1	Raskaan tavaraliikenteen yleiskuvaus	26
3.2	Käyttövoimien murros raskaassa liikenteessä	27
3.2.1	Käyttövoimien yleiskuvaus	27
3.2.2	Voimalinjat	28
3.2.3	Päästötavoitteiden vaikutus vaihtoehtoisten käyttövoimien myyntiin	30
3.3	Siirtymän haasteet	30
3.3.1	Taloudelliset haasteet	31
3.3.2	Teknologiset haasteet	32
3.3.3	Infrastruktuurin haasteet	33
3.3.4	Yhteiskunnalliset haasteet	34
3.3.5	Ympäristöhaasteet	35
4	Käyttövoimat raskaassa liikenteessä	36

4.1 Diesel	36
4.1.1 Käyttövoiman perusteet	36
4.1.2 Ympäristövaikutukset	37
4.2 HVO-diesel	39
4.2.1 Käyttövoiman perusteet ja kehityksen nykytila	39
4.2.2 HVO-dieselin tuotanto	40
4.2.3 Ympäristövaikutukset	42
4.2.4 Käyttö raskaassa liikenteessä ja biopolttoaineiden muut käyttösovellukset	43
4.3 Biometaani	44
4.3.1 Käyttövoiman perusteet	44
4.3.2 Käyttövoiman kehityksen nykytila	46
4.3.3 Jakeluinfrastruktuuri	47
4.3.4 Biometaanin tuotanto	48
4.3.5 Ympäristövaikutukset	50
4.3.6 Käyttö raskaassa liikenteessä ja biometaanin muut käyttösovellukset	53
4.4 Sähkö	54
4.4.1 Käyttövoiman perusteet	54
4.4.2 Käyttövoiman kehityksen nykytila	54
4.4.3 Käyttövoiman ominaisuudet	56
4.4.4 Latausinfrastruktuuri	60
4.4.5 Ympäristövaikutukset	61
4.4.6 Käyttö raskaassa liikenteessä	63
4.5 Polttokenno	64
4.5.1 Moottoritekniikan perusteet	64
4.5.2 Käyttövoiman kehityksen nykytila	65
4.5.3 Käyttövoiman ominaisuudet	66
4.5.4 Jakeluinfrastruktuuri	68
4.5.5 Vedyn tuotanto	69
4.5.6 Ympäristövaikutukset	72
4.5.7 Käyttö raskaassa liikenteessä ja vedyn muut käyttösovellukset	74
5 Raskas tavaraliikenne Suomessa	76
5.1 Suomen tavaraliikenteen yleiskuvaus	76
5.1.1 Raskaan liikenteen ajoneuvokanta	77
5.1.2 Ajoneuvokannan ominaispiirteet Suomessa	79
5.1.3 Vaihtoehtoisten käyttövoimien osuus	81
5.2 Ilmasto-olosuhteet	82
5.3 Raskaan liikenteen päästöt ja toimenpiteet päästöjen vähentämiseksi	84

5.4	Vaihtoehtoisten käyttövoimien saatavuus Suomessa	86
5.4.1	HVO-diesel	86
5.4.2	Biometaani	87
5.4.3	Sähkö	87
5.4.4	Vety	88
6	Kustannuslaskenta	90
6.1	Ajoneuvotyypit	90
6.2	Ajoneuvokustannukset	90
6.2.1	Rahoituskulut	92
6.2.2	Poistot	92
6.3	Polttoainekustannukset	93
6.4	Muut kustannukset	96
6.5	Elinkaarikustannukset	98
7	Polttoaineen kulutuksen simulointi VECTO-työkalulla	99
7.1	Ilmanvastus ja vierintävastus	99
7.2	Ajoprofiili	102
7.3	Ajoneuvo kohtainen polttoaineen kulutus	102
7.4	Kulutuksen vaikutus sähköisten ajoneuvojen käyttökustannuksiin	106
8	Kustannusvertailu	108
8.1	Ajoneuvokustannusten vaikutus elinkaarikustannuksiin	115
8.2	Polttoainekustannusten vaikutus elinkaarikustannuksiin	118
9	Käyttöpotentiaali	126
9.1	Polttomoottoriajoneuvot	126
9.2	Sähkömoottoriajoneuvot	127
9.2.1	Sähkö	127
9.2.2	Polttokenno	130
9.3	Sähköisen ajoneuvon energiatehokkuuden vaikutus käyttöpotentiaaliin	131
10	Johtopäätökset	135
11	Lähdeluettelo	141

KUVAT

Kuva 1. Raskaan liikenteen päästöjen kehitys 1990–2020	14
Kuva 2. Polttoaineiden tuotanto käyttövoimittain sekä niistä syntyvien päästöjen sisällyttäminen elinkaariarviointiin ja well-to-wheels-malliin	16
Kuva 3. Voimalinjojen toimintaperiaatteet	28
Kuva 4. Vaihtoehtoisilla käyttövoimilla kulkevien raskaiden ajoneuvojen myynti Euroopassa vuodesta 2008 alkaen	29
Kuva 5. Metaanin käyttö raskaassa liikenteessä	45
Kuva 6. Vedyn tuotantomenetelmiä	71
Kuva 7. Kuorma-autoliikenteen suoritteet Suomessa 2023 kuljetusetäisyyden mukaan ilman maa-aineksia	76
Kuva 8. Esimerkkejä Suomessa liikenteessä yleisesti käytettävistä ajoneuvoyhdistelmistä	78
Kuva 9. Tavara liikenteen keskimääräiset kuormat maiden sisäisissä maantiekuljetuksissa eri Euroopan maissa 2023	80
Kuva 10. Kuorma-autojen ensirekisteröinnit Suomessa käyttövoiman mukaan	81
Kuva 11. Uusiutuvien polttoaineiden vähimmäisosuus energiasisällön kokonaismäärästä eli jakeluelvoite vuosina 2020–2030	85
Kuva 12. Talviolosuhteissa ajettavan 42 tonnin biometaanikäyttöisen puoliperävaunuyhdistelmän määritykset VECTO-ohjelmassa	100
Kuva 13. VECTO-ohjelman luoma analyysi ajoneuvon nopeudesta simuloidun matkan aikana 42 tonnin biometaanikäyttöisellä puoliperävaunuyhdistelmällä	102
Kuva 14. Ajoneuvojen hankintakustannusten vaikutus ajoneuvoyhdistelmien elinkaarikustannuksiin.	116
Kuva 15. Polttoainekustannusten muutosten vaikutukset ajoneuvoyhdistelmien elinkaarikustannuksiin	124

TAULUKOT

Taulukko 1. Keskimääräiset lämpötilat Suomen kaupungeissa kuukausittain 1991–2020 celsiusasteikolla	83
Taulukko 2. Ajoneuvotyypit ja -suoritteet	90
Taulukko 3. Eri ajoneuvotyyppien ja käyttövoimien hankintakustannukset	91
Taulukko 4. Polttoaineiden energiasisällöt	94
Taulukko 5. Käyttövoimien energialähteiden hinnat ja verojen osuus euroina	96
Taulukko 6. Eri ajoneuvotyyppien ja käyttövoimien huolto- ja rengaskustannukset	97
Taulukko 7. Yhteenvedo simulaatioissa käytetyistä arvoista ajoneuvotyypeittäin	101
Taulukko 8. Ajoneuvojen VECTO-simuloidut kulutuslukemat puoliperävaunu, täysperävaunu- ja HCT-yhdistelmillä	103
Taulukko 9. Sähköisten ajoneuvojen energiankulutus	107
Taulukko 10. Puoliperävaunuyhdistelmien kustannusvertailu	108
Taulukko 11. Täysperävaunuyhdistelmien kustannusvertailu	110
Taulukko 12. HCT-yhdistelmien kustannusvertailu	111
Taulukko 13. Kilometrikustannukset ajoneuvotyypeittäin	113
Taulukko 14. Polttoainekustannusten muutosten vaikutukset puoliperävaunuyhdistelmien elinkaarikustannuksiin	122
Taulukko 15. Polttoainekustannusten muutosten vaikutukset täysperävaunuyhdistelmien elinkaarikustannuksiin	122
Taulukko 16. Polttoainekustannusten muutosten vaikutukset HCT-yhdistelmien elinkaarikustannuksiin	123
Taulukko 17. Polttomoottoriajoneuvojen päivittäinen polttoaineenkulutus	127
Taulukko 18. Akkukäyttöisen sähköajoneuvon päivittäinen energian kulutus ja tarvittavien latausten määrät	128
Taulukko 19. Polttokennokäyttöisen sähköajoneuvon päivittäinen energiankulutus ja tarvittavien tankkausten määrät	130
Taulukko 20. Energiatohokkuuden paranemisen vaikutukset ajoneuvojen kulutus- ja latausmääriin	132
Taulukko 21. Energiatohokkuuden paranemisen vaikutukset ajoneuvojen kustannuksiin	133

1 Johdanto

1.1 Johdatus aiheeseen

1.1.1 Ilmastonmuutos

Ilmastonmuutos on yksi ihmiskunnan historian merkittävimmistä haasteista, ja se on aiheutunut ensisijaisesti fossiilisten polttoaineiden käytöstä viimeisen kahdensadan vuoden aikana (Yhdistyneet kansakunnat 2024a). Kansainväliset sopimukset, kuten Yhdistyneiden kansakuntien ilmastonmuutosta koskeva puitesopimus, Kioton pöytäkirja ja Pariisin ilmastopöytäkirja edistävät toimia maapallon lämpötilan nousun hillitsemiseksi päästöjen sääntelyllä (Sporkmann ym. 2023).

Ensimmäiset askeleet ilmastonmuutoksen torjunnassa otettiin vuonna 1992 järjestetyn Yhdistyneiden kansakuntien ympäristö- ja kehityskonferenssin (United Nations Conference on Environment and Development, UNCED) myötä. Konferenssissa määriteltiin, että ympäristönäkökulmat tulee ottaa huomioon taloudellisessa ja sosiaalisessa päätöksenteossa, jonka myötä luotiin Ilmastonmuutosta koskeva Yhdistyneiden kansakuntien puitesopimus (United Nations Framework Convention on Climate Change, UNFCCC) (Yhdistyneet kansakunnat 2024b). Sopimuksessa määritettiin, että maailmanlaajuinen ilmastonmuutos vaatii kaikkien maiden mahdollisimman laajaa yhteistyötä ja osallistumista ilmastonmuutosta hillitseviin vastatoimiin (Yhdistyneet kansakunnat 1992). Sopimusta täydennettiin vuonna 1997 Kioton pöytäkirjalla, jossa teollisuusmaat sitoutuivat vähentämään kasvihuonekaasupäästöjään vuosina 2008–2012 alle vuoden 1990 tason (Yhdistyneet kansakunnat 1998). Euroopan unionin (EU) jäsenvaltiot sitoutuivat vähentämään kasvihuonepäästöjään keskimäärin kahdeksan prosenttia, ja Suomen tavoitteeksi määriteltiin päästöjen pitäminen vuoden 1990 tasolla (Ulkoministeriö 2002).

Vuonna 2015 syntyi Pariisin ilmastopöytäkirja, jonka tavoitteena on hillitä ilmastonmuutosta rajaamalla lämpötilan nousu alle kahteen celsiusasteeseen esiteolliseen aikaan verrattuna. Sopimuksessa valtiot sitoutuvat toimiin päästöjen vähentämiseksi. (Yhdistyneet kansakunnat 2015). EU on sopimuksessa asettanut tavoitteekseen vähentää kasvihuonepäästöjä 55 prosenttia vuoden 1990 tasolta vuoteen 2030 mennessä (Euroopan komissio 2023a). Asetettujen rajoitteiden avulla pyritään taittamaan lämpötilan nousu ennen kuin se muuttuu hallitsemattomaksi. (Sporkmann ym. 2023).

1.1.2 Vihreä muutos liikenteessä

Tieliikenne vastaa viidenneksestä kaikista kasvihuonepäästöistä EU:n alueella (Danielis ym. 2022), ja raskaat ajoneuvot muodostavat puolestaan viidesosan kaikista tieliikenteen päästöistä (Mulholland 2024). Muiden liikennemuotojen tapaan raskaassa liikenteessä käytetään pääasiassa fossiilisia polttoaineita. Fossiiliseen polttoaineeseen perustuvan liikenteen korvaamiseen muilla energianlähteillä on kestävyysnäkökulmasta kaksi merkittävää ajuria: fossiilisten öljyvarantojen rajallisuus ja liikenteen ilmastovaikutukset (Serra 2012). Öljypohjaisten polttoaineiden korvaaminen liikenteessä on kuitenkin osoittautunut haasteelliseksi, ja päästöjen vähentäminen raskaassa liikenteessä on osoittautunut vielä vaikeammaksi kuin henkilöautoliikenteessä (de Blas ym. 2020).

Monilla vaihtoehtoisilla käyttövoimilla on takanaan pitkä historia diesel- ja bensiinimootoreiden dominanssista huolimatta. Ensimmäisten ladattavien akkukäyttöisten sähköisten ajoneuvojen historia kantaa 1880-luvun alkuun eli muutamia vuosia polttomootoriajoneuvoja kauemmas. 1800-luvun lopulla sähköisillä ajoneuvoilla saavutettiin useita ajoneuvojen nopeusennätyksiä, ja vielä 1900-luvun alussa niiden markkinaosuus oli polttomootoriajoneuvoja suurempi. (Guarnieri 2012). Rudolf Diesel käytti biopolttoaineita ja kasviöljyjä moottoreissaan jo 1800-luvun lopussa (Unglert ym. 2020). Maakaasua on puolestaan käytetty ajoneuvoissa Italiassa jo 1930-luvulla, ja sen merkitys ajoneuvojen käyttövoimana kasvoi useissa maissa 1970-luvun energiakriisin myötä (Yeh 2007). Vetyä hyödyntävistä polttokennoajoneuvoista on povattu kilpailukykyistä käyttövoimaa tulevaisuudessa erityisesti raskaille ajoneuvoille (Çabukoglu ym. 2018), joskin ensimmäinen polttokennoajoneuvo näki päivänvalon jo 1960-luvulla (GM 2025).

Teknologisen kehityksen ohella energiapolitiikalla on merkittävä vaikutus siihen, kuinka tavoitteet hiilineutraalisuudessa ovat saavutettavissa (Letkiewicz ym. 2023). Vaihtoehtoisten käyttövoimien osuus kuitenkin jäänyt vähäiseksi, sillä vuonna 2023 EU:n alueella rekisteröidyistä uusista yli 16 tonnin kuorma-autoista 96,5 prosenttia oli dieselkäyttöisiä (ACEA 2024a).

1.2 Tutkimuksen aihe ja tutkimuskysymykset

Tässä työssä arvioidaan raskaan liikenteen kuljetusten elinkaarikustannuksia Suomessa eri käyttövoimien välillä eri ajoneuvotyyppien osalta. Aiheen tarkastelu nimenomaisesti Suomen osalta on tärkeää, sillä raskaan liikenteen toimintamallit Suomessa poikkeavat

merkittävästi moneen muuhun maahan verrattuna. Suomen lainsäädäntö mahdollistaa liikennöinnin EU-aluetta painavammilla ja pidemmillä ajoneuvoilla (SKAL 2023a), ja pitkät ja kylmät talvet kasvattavat ajoneuvojen energiankulutusta (Lahti & Tantt 2018), mikä tuo omat haasteensa eri käyttövoimien hyödyntämiselle.

Raskaan liikenteen voimalinjat perustuvat joko poltto- tai sähkömoottorin käyttöön. Työssä vertailtavat ajoneuvot käyttövoimien ja voimalinjojen osalta ovat

- dieselkäyttöiset polttomoottoriajoneuvot
- HVO-dieselkäyttöiset polttomoottoriajoneuvot
- biometaanikäyttöiset polttomoottoriajoneuvot
- akkukäyttöiset sähköajoneuvot
- polttokennokäyttöiset sähköajoneuvot.

Kustannusvertailussa käytettävät ajoneuvotyypit kokonaismassoineen ovat

- 42 tonnin puoliperävaunuyhdistelmät
- 64 tonnin täysperävaunuyhdistelmät
- 76 tonnin HCT-yhdistelmät.

Ajoneuvojen kustannusvertailussa on tarkasteltu ajoneuvojen hankintakustannuksia sekä ajoneuvon käytöstä syntyviä kustannuksia, mukaan lukien polttoaine-, huolto- ja vakuutuskustannukset. Ajoneuvojen polttoainekustannusten arvioinnissa on käytetty apuna VECTO-simulointiohjelmistoa (Vehicle Energy Consumption calculation TOol), joka on Euroopan komission kehittämä työkalu raskaiden ajoneuvojen päästöjen ja polttoaineen kulutuksen arviointiin. VECTO-ohjelmalla ajoneuvojen energiankulutusta voidaan arvioida erilaisten parametrien, kuten ajoneuvon massan, vierintävastuksen ja ilmanvastuksen avulla (Euroopan komissio 2024a). Samalla parametrit mahdollistavat polttoaineen kulutuksen erillisen arvioinnin talvikuukausille.

Vaihtoehtoisista käyttövoimista erityisesti akkukäyttöisillä sähköisillä ajoneuvoilla voi olla haasteita vastata raskaan liikenteen toimintamatkoihin (Shoman ym. 2023). Työssä onkin arvioitu erikseen eri käyttövoimien mahdollisuudet suoriutua eri ajoneuvotyypeiltä edellytettävistä kilometrisuoritteista. Ajoneuvoilta edellytettävät vuosittaiset

kilometrulukemat pohjautuvat Tilastokeskuksen (2022) käyttämiin ajoneuvotyyppikohtaisiin ajosuoritteisiin, jotka ovat puoliperävaunuyhdistelmille 100 000 kilometriä, täysperävaunuyhdistelmille 125 000 kilometriä ja HCT-ajoneuvoyhdistelmille (High Capacity Transport) 170 000 kilometriä vuodessa.

Tutkimuksessa tarkastellaan seuraavia tutkimuskysymyksiä:

- Kuinka käyttövoimien teknologiat eroavat toisistaan raskaassa liikenteessä ja millä tavoin eri käyttövoimat vastaavat EU:n tavoitteisiin vähentää hiilidioksidipäästöjä?
- Millä tavoin Suomen ominaispiirteet vaikuttavat ajoneuvojen kustannusrakenteseen?
- Mitkä ovat eri käyttövoimien elinkaarikustannukset eri ajoneuvotyypeillä raskaassa liikenteessä Suomessa?
- Mitkä ovat eri käyttövoimien toimintaedellytykset eri ajoneuvotyypeillä raskaassa liikenteessä Suomessa?

1.3 Tutkimuksen rakenne

Toisessa luvussa tarkastellaan raskaan liikenteen roolia päästöjen lähteenä EU:ssa ja päästöjen arvioinnissa käytettyjä malleja. Luvussa tarkastellaan myös EU:n määrittämiä tavoitteita ja keinoja liikenteen päästöjen vähentämiseksi.

Kolmannessa luvussa käsitellään raskaan tavaraliikenteen roolia yhteiskunnan ja talouden toiminnassa. Luvussa käydään lisäksi läpi eri käyttövoimien ja voimalinjojen toimintaperiaatteet ja keskinäiset eroavaisuudet sekä raskaan liikenteen kohtaamat haasteet talouden, teknologian, infrastruktuurin, yhteiskunnan ja ympäristön näkökulmasta vähäpäästöisiin vaihtoehtoihin siirryttäessä.

Neljännessä luvussa käydään läpi yksitellen jokaisen vertailtavan käyttövoiman perusteet ja ominaispiirteet. Käyttövoimien osalta tarkastellaan mm. teknologian ja infrastruktuurin nykytilannetta, voimanlähteenä käytettävän energian tuotantoedellytyksiä, käytön ympäristövaikutuksia sekä soveltuvuutta raskaaseen liikenteeseen.

Viidennessä luvussa tarkastellaan raskaan liikenteen toimintaa Suomessa. Luvussa arvioidaan raskaan liikenteen roolia Suomen taloudessa sekä raskaan liikenteen osuutta Suomen päästöistä. Luvussa esitellään myös, kuinka ajoneuvojen massaan liittyvä lainsäädäntö ja Suomen ilmasto tuovat Suomessa ajettaville raskaille kuljetuksille muusta maailmasta poikkeavat olosuhteet. Lisäksi luvussa tuodaan esiin mahdolliset kansalliset keinot nolla- ja vähäpäästöisten ajoneuvojen osuuden lisäämiseksi sekä tarkastelun eri käyttövoimien yleistymisen edellytyksistä mm. Suomen nykyisen infrastruktuurin osalta.

Kuudennessa luvussa käsitellään ajoneuvojen elinkaarikustannuksissa käytettävä kustannuslaskentamalli. Luvussa määritetään ajoneuvokustannukset, polttoainekustannukset sekä huolto- ja vakuutuskustannukset kaikille käyttövoimille ja kaikille ajoneuvotyypeille eli puoliperävaunu-, täysperävaunu- sekä HCT-yhdistelmille.

Polttoainekustannusten määrittelyssä on käytetty VECTO-simulaatiotyökalua. VECTO-ohjelmaa, simuloinnissa käytettyjä arvoja ja simulaatioista saatuja polttoaineiden kulu- tuskemia käsitellään seitsemännessä luvussa.

Ajoneuvojen elinkaarikustannuksia vertaillaan kahdeksannessa luvussa. Kustannusver- tailuissa on eritelty ajoneuvotyypeittäin ajoneuvo-, polttoaine- ja muut kustannukset sekä vuositasolla että diskontattuna ajoneuvon koko elinkaaren ajalta. Lisäksi luvussa tehdään ajoneuvo- ja polttoainekustannusten osalta herkkyystarkastelua mahdollisten kustannus- muutosten vaikutusten arvioimiseksi.

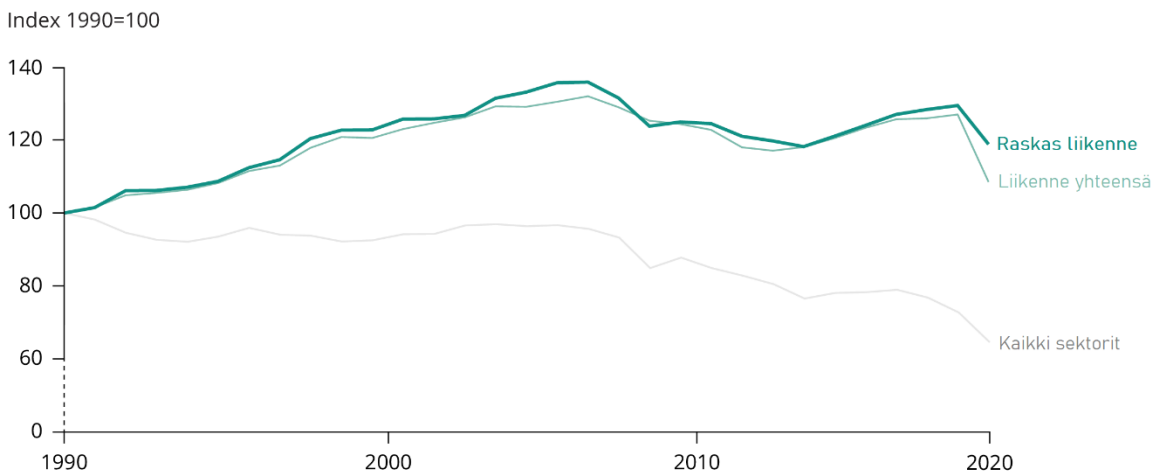
Yhdeksännessä luvussa otetaan tarkasteltavaksi, kuinka käyttövoimat pystyvät suoriutu- maan eri ajoneuvotyypeiltä edellytettävistä päivittäisistä kilometrisuoritteista. Sähköisten ajoneuvojen osalta tehdään vielä tarkempaa herkkyystarkastelua akun energiatehokkuu- den kehityksen vaikutuksesta ajoneuvojen käyttöpotentiaaliin.

Tutkielman viimeinen eli kymmenes luku sisältää tulosten perusteella tehdyt johtopää- tökset.

2 Liikenteen päästöt ja sääntely päästöjen vähentämiseksi

2.1 Liikenteen rooli päästöjen lähteenä

Hiilidioksidi on ylivoimaisesti merkittävin kasvihuonekaasupäästöjen lähde Euroopassa, ja se muodostaa 80 prosenttia kaikista EU:ssa taloudellisesta toiminnasta aiheutuneista päästöistä hiilidioksidiekvivalenttitoimissa mitattuna. Toiseksi suurin päästölähte on metaani, joka muodostaa 12 prosenttia kokonaispäästöistä (Euroopan parlamentti 2023). Euroopassa hiilidioksidipäästöt ovat vähentyneet vuoden 1990 3,6 miljoonasta kilotonnista 2,5 miljoonaan kilotonniin vuonna 2020 (Maailmanpankki 2023). Vaikka kasvihuonepäästöt ovat Euroopassa vähentyneet kokonaisuudessaan 30 prosenttia, ovat samanaikaisesti liikenteen aiheuttamat kasvihuonepäästöt kasvaneet 33 prosenttia (EEA 2022a) (kuva 1).



Kuva 1. Raskaan liikenteen päästöjen kehitys 1990–2020 (EEA 2022b)

Hiilidioksidipäästöjen vähentäminen fossiilisten energialähteiden käyttöä rajoittamalla on välttämätöntä ilmastonmuutoksen hillitsemiseksi. Liikennesektori on keskeisessä asemassa kasvihuonekaasupäästöjen vähentämisessä, sillä se käyttää yli puolet tuotetuista nestemäisistä polttoaineista. Päästöjen vähentämiseksi onkin tärkeää saada myös liikenteen päästömääriä vähennettyä (de Blas ym. 2020; Danielis ym. 2022).

Vuonna 1990 liikenteen osuus kaikista kasvihuonepäästöistä nykyisissä EU-maissa oli 15 prosenttia, ja vuonna 2017 osuus oli noussut jo 27 prosenttiin. Liikennesektorin muodostamista kokonaispäästöistä 72 prosenttia syntyi tieliikenteestä. Tieliikenteen päästöistä raskaan liikenteen eli pääasiassa kuorma- ja linja-autojen osuus on kasvanut merkittävästi

ollen vuonna 2021 28 prosenttia (Danielis ym. 2022; Mulholland 2024), ja raskaan liikenteen päästöistä puolestaan 73 prosenttia muodostui kuorma-autojen aiheuttamista päästöistä (Euroopan komissio 2024b). Kuorma-autoliikenteen osuus Euroopan kokonaispäästöistä on näin ollen neljä prosenttia ja tieliikenteen päästöistä 20 prosenttia, vaikka kuorma-autojen osuus kokonaisliikenteestä on ainoastaan kaksi prosenttia (Mulholland 2024).

Liikenne aiheuttaa hiilidioksidipäästöjen (CO₂) lisäksi myös muita erilaisia terveydelle haitallisia päästöjä. Merkittävimmät liikenteestä syntyvät ilmansaasteet ovat typen oksidit (NO_x) hiilimonoksidi (CO), ammoniakki (NH₃), haihtuvat orgaaniset yhdisteet kuten metaani (CH₄) sekä hiukkaspäästöt (Suarez-Bertoa ym. 2020). EU:n alueella aikaisempaa vähäpäästöisemmällä ajoneuvoilla on ollut tällä vuosituhannella merkittävä vaikutus näiden päästöjen hillitsemisessä, vaikka liikenteen kokonaismäärä onkin kasvanut. Ajoneuvojen päästörajoitukset ovat laskeneet typpioksidin- ja hiukkaspäästöjä Euroopassa, vaikka päästöjä ei olekaan saatu laskettua tasolle, jossa ne eivät aiheuttaisi uhkaa ihmisille ja ympäristölle. (Mendoza-Villafuerte ym. 2017). Esimerkiksi Euroopan suurimmissa kaupungeissa kuorma-autot ovat vastuussa 12–26 prosentista kaikista NO_x-päästöistä (Transport & Environment 2021a). Ajoneuvokohtaisten päästöjen hillitseminen onkin tärkeää, sillä raskaan liikenteen määrän odotetaan kasvavan EU:n alueella edelleen nykytasosta 44 prosenttia vuoteen 2050 mennessä. (Euroopan Komissio 2021)

2.2 Liikenteestä syntyvien päästöjen arviointi

Liikenteestä syntyviä päästöjä voidaan arvioida joko elinkaariarvioinnin (LCA, life cycle assessment) tai well-to-wheels-mallin (WtW) avulla. Elinkaariarviointi ottaa huomioon kaikki raskaan liikenteen päästövaikutukset mukaan lukien ajoneuvojen valmistamiseen, käyttöön sekä hävittämiseen liittyvät kustannukset raaka-aineiden louhinnasta alkaen (Alamia ym. 2016; Miller 2016). Molnár ym. (2023) korostavat elinkaariarvioinnin roolia todellisten päästöjen määrittelemiseksi, jolloin sekä tuotanto- että käyttövaihe otetaan huomioon. Arviointi kuitenkin edellyttää, että todelliset päästöt ovat määriteltävissä kummassakin vaiheessa. Liikenteestä syntyvien päästöjen elinkaariarvioinnissa voidaan tällöin esimerkiksi Argonne National Laboratoryn luomaa GREET-mallia (The Greenhouse Gases, Regulated Emissions, and Energy Use in Transportation) (The U.S. Department of Energy 2024). Millerin (2016) mukaan kokonaisvaltainen päästöjen arviointi on

vaiheet ensisijaisen energianlähteen, kuten öljyn, kaasun tai biopolttoaineiden pumppaamisesta, louhinnasta tai kasvatuksesta ajoneuvon tankkaamiseen valmiilla polttoaineella. (Joint Research Centre 2020). Tuotantovaiheessa uusiutuvien polttoaineiden päästöjen arvioinnissa sovelletaan ns. kasvihuonekaasuhyvityksiä, jolloin polttoaineiden laskennalliset päästöt voivat olla negatiivisia. Hyvityksiä käytetään sellaisten raaka-aineiden hyödyntämisestä, jotka syntyvät ruoantuotannon ja erilaisten yhteiskunnan toimintojen sivuvirtoina. Tällöin mm. lannasta tai jätevesistä saatavan energian hyödyntämisen arvioidaan vähentävän päästöjä, joita niistä olisi ilman jatkokäsittelyä syntynyt. (Kolb ym. 2021; Biddart ym. 2022). Erityisesti biopolttoaineiden, kuten biometaanin ja biodieselin tuotannosta syntyvien päästöjen arviointi on haastavaa, sillä arviot niiden tuotannosta syntyvistä päästöjen määristä vaihtelevat merkittävästi erilaisten laskentatapojen välillä (Danielis ym. 2022). EU:ssa onkin määritelty eri uusiutuvien polttoaineiden tuotantoketjuille laskennalliset tuotannon päästöarvot RED II -direktiivin liitteessä V (ks. luku 2.6).

Tuotantovaiheen päästöjen osuus ajoneuvojen kokonaispäästöistä vaihtelee merkittävästi eri käyttövoimien välillä. Kun päästöt biopolttoaineiden osalta ovat usein negatiivisia (Kolb ym. 2021), muodostuu fossiilisia polttoaineita hyödyntävien ajoneuvojen päästöistä noin 15–20 prosenttia tuotantovaiheessa (Rial & Pérez 2021). Sähkö- ja polttokennoajoneuvoilla päästöt taas muodostuvat lähes kokonaisuudessaan sähkön tuotannosta syntyvistä päästöistä (Cunanan ym. 2021).

Käyttövaihe ottaa huomioon ajoneuvojen käytöstä, eli tankkauksen jälkeen syntyvät päästöt. Akkukäyttöisten sähköajoneuvojen ja polttokennoajoneuvojen käytöstä ei muodostu juuri lainkaan päästöjä (Cunanan ym. 2021). Sen sijaan noin 80–85 prosenttia fossiilisia polttoaineita hyödyntävien diesel- ja maakaasuajoneuvojen päästöistä syntyy käytössä (Rial & Pérez 2021). Biopolttoaineiden käytöstä syntyvät päästöt ovat hyvin lähellä fossiilisten polttoaineiden muodostamia päästöjä (Miller 2016). Tämä voi heikentää biopolttoaineiden houkuttelevuutta, mikäli päästöjä arvioidaan vain käytöstä syntyvien päästöjen osalta eikä ns. negatiivisia päästöarvoja oteta huomion. Toisaalta on tärkeää huomioida, että käytöstä syntyvät korkeat päästöt johtavat siihen, että biopolttoaineiden haittavaikutukset esim. kaupunkiympäristössä voivat vastata fossiilisia polttoaineita (Lajevardi ym. 2019).

2.3 EU:n liikennettä ohjaavat päästötavoitteet ja säädökset

2.3.1 Uusiutuvan energian direktiivi (2009/28/EY) ja White Paper 2011: Roadmap

EU on asettanut vuodesta 2009 lähtien useita tavoitteita ja säädöksiä liikenteestä syntyvien päästöjen vähentämiseksi. Uusiutuvan energian direktiivissä (RED, Renewable Energy Directive, 2009/28/EY) määriteltiin, että vuoteen 2020 mennessä vähintään 20 prosenttia kokonaisenergiatarpeesta on tuotettava uusiutuvalla energialla. Samalla liikenteen osalta asetettiin tavoitteeksi, että kaikkien EU-maiden liikennepolttoaineista vähintään 10 prosenttia olisi peräisin uusiutuvista lähteistä vuoteen 2020 mennessä. (Euroopan parlamentti ja Euroopan unionin neuvosto 2009). Biodieselin ja polttoaineeseen lisätyn etanolin hyödyntäminen polttoaineissa olivat pääasiallisia käyttöönotettuja keinoja uusiutuvan energian osuuden lisäämiseksi (Danielis ym. 2022).

Euroopan komission esittelemä vuoden 2011 tiekartta määrittä keinoja vähäpäästöisen liikennejärjestelmän kehittämiseksi. Tavoitteeksi vuodelle 2050 esitettiin vähintään 60 prosentin leikkausta liikenteen kokonaispäästöihin vuoteen 1990 verrattuna, samalla kun tieliikenteen päästöt vähennettäisiin lähelle nollassa (Euroopan komissio 2011).

2.3.2 Uusiutuvan energian direktiivi II ja Euroopan vihreän kehityksen ohjelma

Vuonna 2018 luotiin uusi uusiutuvan energian direktiivi (RED II, Renewable Energy Directive (EU) 2018/2001) vastaamaan Pariisin sopimuksessa asetettuihin vuoden 2030 tavoitteisiin. Vuodelle 2030 määriteltiin tavoitteeksi tuottaa vähintään 32 prosenttia kokonaisenergiatarpeesta uusiutuvalla energialla ja nostaa vastuullisesti tuotettujen uusiutuvien polttoaineiden osuus 14 prosenttiin (Euroopan komissio 2024c). Samalla niin kutsuttujen edistyneiden polttoaineiden osuuden tulisi olla 3,5 prosenttia polttoaineiden kokonaiskulutuksesta (Prussi ym. 2019). Direktiivi sitouttaa jäsenvaltioita kehittämään kattavia 10-vuotisia kansallisia energia- ja ilmastosuunnitelmia, vaikka ei suoraan sidokaan jäsenmaita uusien tavoitteiden saavuttamisessa (Widuto 2023).

Vuonna 2019 EU ratifioi Euroopan vihreän kehityksen ohjelman (European Green Deal), joka velvoittaa jäsenmaita vähentämään yhdessä kasviuonepäästöjä vähintään 55 prosenttia vuoden 1990 tasosta. Lisäksi se määrittää EU:n tavoitteeksi nettokasviuonekaasupäästöjen vähentämisen nollassa vuoteen 2050 mennessä (Euroopan komissio

2019). Euroopan vihreän kehityksen ohjelma pyrkii edistämään päästöjen vähentämiseen perustuvaa kaupankäyntiä ja investointeja sekä yksityisten toimijoiden että julkisten hankintojen osalta. Se kattaa kaikki talouden sektorit, mutta keskittyy erityisesti liikenteen, energian, maatalouden ja rakentamisen päästöjen vähentämiseen (Letkiewicz ym. 2023). Siddin (2020) mukaan EU:n tulee kehittää monipuolisesti erilaisia strategioita ohjelman tavoitteiden saavuttamiseksi, jotta siirtymä saadaan toteutettua taloudellisesti tasapuolisesti Euroopan maiden välillä ja kaikki toimijat sitoutettua tarvittaviin päätöksiin. Tämä nähdään tärkeänä, sillä vaikka ohjelma asettaa suuntaviivat koko EU:n vihreälle siirtymälle, tavoitteen saavuttaminen on riippuvainen ensisijaisesti jäsenvaltioiden sitoutumisesta tehtyihin päätöksiin (Letkiewicz ym. 2023). Tavoitteiden saavuttamiseksi onkin käynnistetty jäsenmaissa erilaisia maakohtaisia hankkeita (Sporkmann ym. 2023).

2.3.3 Uusiutuvan energian direktiivi III ja ETS2

EU asetti 55-valmiuspaketissa (Fit for 55) tavoitteekseen vähentää kasvihuonekaasujen nettopäästöjä vähintään 55 prosenttia vuoteen 2030 mennessä. Osana toimenpiteitä tavoitteen saavuttamiseksi kolmas uusiutuvan energian direktiivi eli RED III (Renewable Energy Directive (EU) 2023/2413) astui voimaan marraskuussa 2023. Siinä tavoitellaan uusiutuvan energian osuuden nostamista kokonaisenergian tuotannosta vuoteen 2030 mennessä vähintään 42,5 prosenttiin aiemmasta 32 prosentista, mikä edellyttää uusiutuvan energian käytön kaksinkertaistamista EU:n alueella (Euroopan komissio 2024c). Direktiivissä pyritään tukemaan energiapolitiikkaa, jolla vähennetään riippuvuutta fossiilisista tuontipolttoaineista. Liikenteen sähköistämisen lisäksi direktiivissä korostetaan eri vaihtoehtojen, kuten biopolttoaineiden ja vetyyn pohjautuvien ratkaisujen merkitystä erityisesti vaikeasti sähköistettävillä liikenteen aloilla sekä infrastruktuurin merkitystä siirtymässä uusiutuvaa energiaa hyödyntäviin käyttövoimiin. Uusiutuvan energian osuudeksi energian loppukulutuksesta liikennealalla on määritelty vähintään 29 prosenttia vuoteen 2030 mennessä (Euroopan parlamentti ja Euroopan unionin neuvosto 2023a).

EU:n päästökauppajärjestelmä (EU Emissions Trading System, EU ETS) otettiin käyttöön vuonna 2005, ja se on yksi EU:n merkittävimmistä välineistä hiilidioksidipäästöjen rajoittamiseksi. Järjestelmässä päästöille on määritelty vuosittain laskeva kokonaispäästömäärä, ja järjestelmään kuuluvat toimijat voivat myydä ja ostaa päästöoikeuksia. Päästöoikeuksien hinta toimii kannustimena yrityksille vähentää päästöjä. Päästökauppajärjestelmän piirissä on noin 10 000 toimijaa energiatuotannosta, teollisuudesta ja

lentoliikenteestä, ja järjestelmässä mukana olevat toimijat vastaavat noin 40 prosentista EU-alueen kokonaispäästöistä (Euroopan komissio 2024c). Vuoden 2024 alusta alkaen päästökauppajärjestelmä on laajennettu porrastetusti koskemaan myös meriliikennettä suurten toimijoiden osalta, ja järjestelmän piirissä ovat kaikki EU:n satamiin saapuvat alukset (Euroopan komissio 2024c).

Tieliikenne on ollut suurin päästökaupan ulkopuolinen kasvihuonepäästöjen aiheuttaja EU:n alueella (Miller 2016). Vuonna 2023 EU esitteli olemassa olevan päästökauppajärjestelmän rinnalle uuden järjestelmän, ETS2:n. Uusi järjestelmä kattaa uusien teollisuudenalojen ja rakennusten lisäksi myös kuljetusliikenteen, ja sen tarkoituksena on luoda markkinapohjaisia kannustimia vähäpäästöiseen liikkuvuuteen (Euroopan komissio 2024c). Kustannukset kohdistetaan liikenteessä fossiilisiin polttoaineisiin, ja uusi järjestelmä on määrä ottaa käyttöön asteittain vuodesta 2027 alkaen (Euroopan komissio 2024d).

Robaina ja Neves (2021) sekä Sporkmann ym. (2023) arvioivat, että EU:n päästökauppajärjestelmän ulottaminen kuljetussektoriin vaikuttaa tehokkaasti alan kokonaispäästöihin sekä vähentämällä kuljetusten kokonaismäärää että kannustamalla energiatehokkaampiin kuljetusratkaisuihin. Samalla kun kuljetusten kokonaiskustannukset kasvaisivat päästöoikeuksista maksettujen korvausten myötä, vähäpäästöiset vaihtoehdot muodostuisivat aikaisempaa kilpailukykyisemmiksi vaihtoehdoiksi. Millerin (2016) mukaan maantieliikenteen lisääminen päästökauppajärjestelmän piiriin ei kuitenkaan tuo juurikaan muutoksia kokonaispäästöihin, mikäli se ei merkittävästi vaikuta kokonaiskustannuksiin.

2.4 EU:n raskasta liikennettä ohjaavat päästötavoitteet ja säädökset

EU:ssa raskaan liikenteen päästöjä on säädelty määrittelemällä Euro-päästöluokituksiin perustuvia päästörajoja ajoneuvoille ja vaikuttamalla polttoaineiden laatuun (Suarez-Bertoa ym. 2020) sekä vuodesta 2019 lähtien myös suoraan vähentämällä raskaan liikenteen aiheuttamia kokonaispäästöjä (Euroopan unionin neuvosto 2024a). Lainsäädännöllisten rajoitteiden käyttö on osoittautunut tehokkaaksi keinoksi energiatehokkuuden parantamiseksi ja hiilidioksidipäästöjen vähentämiseksi tieliikenteessä. Portaittain tiukentuvien vaatimusten on tarkoitus johtaa dieselajoneuvojen päästöjen vähentämisen lisäksi pääoman ja kehitystyön siirtymiseen dieselpolttomootorilla toimivista ajoneuvoista kohti vähäpäästöisempiä vaihtoehtoja. (Siskos & Moysoglou 2019).

2.4.1 Euro-päästöluokitus

Ensimmäistä kertaa raskaiden ajoneuvojen päästöjä säädeltiin Euro-päästöluokituksella vuonna 1991. Päästörajoja on laskettu luokituksen avulla asteittain, ja vuoden 2013 lopussa otettiin EU:ssa käyttöön raskaille ajoneuvoille moottorien tyyppihyväksynnässä käyttöön päästöluokka Euro VI, jossa määriteltiin viimeisimpänä päivitettyt raja-arvot raskaiden dieselajoneuvojen muodostamille päästöille. Siinä on määritelty raja-arvot useille eri päästöille: hiilimonoksidille, hiilivedylle, typen oksideille, metaanille, ammoniakille sekä pienhiukkasille (Euroopan parlamentti ja Euroopan unionin neuvosto 2011). Euro VI -luokituksen ajoneuvoilta onkin vaadittu merkittäviä vähennyksiä päästöihin aiempiin luokituksiin verrattuna ja päästörajoja määriteltessä on otettu dieselajoneuvojen lisäksi huomioon maa- ja nestekaasulla toimivat ajoneuvot (Williams & Minjares 2016).

Aiemmista luokituksista poiketen Euro VI -luokituksessa tarkastellaan ajoneuvojen synnyttämiä päästöjä laboratorioympäristön lisäksi myös tieliikenteessä, jossa ajoneuvon päästöjä mitataan monipuolisesti erilaisissa toimintaympäristöissä kannettavan päästömittausjärjestelmän (Portable Emissions Measurement System, PEMS) avulla. Ajoneuvojen kokonaispäästöjä arvioidessa onkin tärkeää mitata myös ajoneuvojen käytöstä syntyviä todellisia päästöjä, sillä ne voivat poiketa merkittävästi laskelmien pohjalta tehdyistä tuloksista, ja päästöjen monipuolisella mittaamisella on saatu varmistettua, että ajoneuvot alittavat päästörajat myös todellisuudessa (Suarez-Bertoa ym. 2016; Williams & Minjares 2016; Mendoza-Villafuerte ym. 2017).

Euro VI -luokan ajoneuvojen päästöjä on pyritty laskemaan useilla eri tavoilla. joista merkityksellisimpiin kuuluu pakokaasuja ureasuihkutuksen avulla vähentävät SCR-järjestelmien (Selective Catalytic Reduction, selektiivinen katalyyttien pelkistäminen) käyttöönotto, hapetukseen perustuvien katalysointijärjestelmien kehittäminen, pakokaasuja kiertävät järjestelmät sekä hiukkasten määrää vähentävät suodattimet (Williams & Minjares 2016). Mainittujen järjestelmien käyttö vähentää merkittävästi syntyneitä hiilimonoksi- ja typen oksidipäästöjä, mutta samalla ne voivat johtaa muiden päästöjen, kuten di-typpioksidin, ammoniakkin ja metaanin määrän kasvuun (Clairotte ym. 2020; Suarez-Bertoa ym. 2020). Kokonaispäästöt jäävät kuitenkin SCR-tekniikkaa hyödyntävillä ajoneuvoilla merkittävästi alhaisemmaksi (Mendoza-Villafuerte ym. 2017).

EU:n neuvosto hyväksyi huhtikuussa 2024 Euro 7 -asetuksen, jossa määritetään uudet päästörajat tieliikenteen ajoneuvoille sekä käyttöikänsä kohdistuvia vaatimuksia.

Pakokaasupäästöjen lisäksi asetuksessa huomioidaan renkaiden kulumisesta ja jarruista muodostuvat päästöt (Euroopan unionin neuvosto 2024b). Asetuksessa asetetaan aiempaa tiukempia raja-arvoja eri epäpuhtauksille koskien raskaita kuorma-autoja ja linja-autoja, ja lisäksi asetus sisältää raja-arvoja myös mm. ammoniakille ja dityppioksidille, jotka eivät ole aiemmin ollut sääntelyn piirissä. Direktiivissä raskaiden ajoneuvojen typen oksidien päästörajaa on alennettu 50 prosenttia ja hiukkaspäästöjen 20 prosentteja (Dornoff & Rodríguez 2024). Euro 7 -asetus tulee voimaan raskaille ajoneuvoille vaiheittain vuosien 2027–2029 aikana (Euroopan unionin neuvosto 2024b).

2.4.2 Direktiivit 2019/1242 ja 2024/1610 hiilidioksidipäästöjen vähentämiseksi

Vuonna 2019 hyväksyttiin asetus 2019/1242, jonka määrittä ensimmäistä kertaa Euroopassa vähennystavoitteet raskaan liikenteen kokonaispäästöille EU:n alueella. Asetus määrittää, että vuodesta 2025 eteenpäin valmistajien valmistamien raskaiden hyötyajoneuvojen tulee tuottaa keskimäärin 15 prosenttia vähemmän ja vuodesta 2030 30 prosenttia vähemmän kasvihuonepäästöjä kuin vertailuajanjaksolla vuosina 2019–2020 (Euroopan parlamentti ja Euroopan unionin neuvosto 2019).

Asetuksessa on määritelty protokollat mm. raskaiden hyötyajoneuvojen moottoreiden ja voimansiirron testaamiselle päästöarvojen mittaamiseksi. Tämän lisäksi hiilidioksidipäästöjä ja polttoaineen kulutusta arvioidaan simulointiväline VECTO:n avulla, jota on käytetty tyyppihyväksynnän välineenä vuoden 2019 alusta alkaen. (Euroopan parlamentti ja Euroopan unionin neuvosto 2019; Euroopan komissio 2024a).

Raskaat ajoneuvot ovat usein monipuolisesti varusteltavissa, jotta ne vastaisivat mahdollisimman hyvin ostajien erilaisiin tarpeisiin. EU:ssa on päädytty päästöjen ja kulutuksen simulointiin, sillä erilaisten kokoonpanojen testaus olisi haastavaa ja kallista ajoneuvojen valmistajille. VECTO:n avulla voidaan simuloida mm. moottoreiden, voimansiirron, kokonaisuusmassojen ja korirakenteen vaikutusta kulutukseen päästöihin erilaisissa ajoympäristöissä, kuten alueellisessa jakelussa tai pitkän matkan liikenteessä erilaisilla voimalinjoilla ja energianlähteillä (Rahkola 2019; Zacharof ym. 2021; Middela ym. 2024). Simuloinnin pohjana toimivat reittien ja olosuhteiden arviot on määritelty koko EU:n alueelle, jolloin yksittäisten maiden olosuhteet saattavat poiketa käytetyistä arvoista. Tämän takia onkin tärkeää arvioida maakohtaisten muuttujien vaikutusta kokonaispäästöihin todellisten päästöjen arvioimiseksi (Middela ym. 2024).

Toukokuussa 2024 hyväksytty asetus 2024/1610 tiukensi vuonna 2019 asetettuja päästörajoja raskaille kuorma-autoille 55-valmiuspaketissa esitettyjen tavoitteiden saavuttamiseksi. Asetuksessa vuoden 2030 raskaan liikenteen päästövähennystavoite asetettiin 45 prosenttiin aiemman 30 prosentin sijasta. Lisäksi päästövähennystavoitteeksi vuodelle 2035 asetettiin 65 prosenttia ja vuodelle 2040 prosenttia (Euroopan unionin neuvosto 2024a). Tavoitteiden saavuttamiseksi tarkastellaan pakollisiin standardoituihin mittareihin perustuvia ajoneuvojen todellisia ajonaikaisia polttoaineenkulutustietoja, ja ajoneuvojen pysymistä vaatimusten sisällä tarkastellaan testien avulla. Mikäli valmistajan havaitaan ylittäneen CO₂-päästöjen enimmäismäärän, valmistaja joutuu maksamaan ylimääräisen päästömaksun, joka on vuodesta 2025 alkaen 4 250 euroa per gCO₂/tonnikilometri ja vuodesta 2030 6 800 euroa per gCO₂/tonnikilometri (Euroopan komissio 2024b). Komission tavoitteena on kehittää päästöjen tarkastelua varten kokonaisvaltainen menetelmä uusien raskaiden ajoneuvojen koko elinkaarenaikaisten hiilidioksidipäästöjen arvioimiseksi (Euroopan unionin neuvosto 2024a).

2.5 Raskaiden ajoneuvojen päästöluokittelu

EU:n direktiivissä 2024/1610 määritellään kriteerit nolla- ja vähäpäästöisille raskaiden ajoneuvojen päästöluokille. Päästöluokittelun tarkoitus on mahdollistaa erilaisia vaihtoehtoisia käyttövoimia tukevia toimenpiteitä mm. päästöhyvitysten muodossa ja antaa valmistajille mahdollisuus arvioida taloudellisesti kannattavimpia keinoja päästöjen vähentämiseksi (Euroopan komissio 2024b).

Direktiivissä määritellyt vaatimukset päästöjen vähentämisestä kannustavat lisäämään erityisesti nollapäästöisten raskaiden hyötyajoneuvojen osuutta kokonaiskannasta. Nollapäästöisiin ajoneuvoihin sisällytetään tällä hetkellä akkukäyttöiset sähköajoneuvot, polttokennoajoneuvot ja muut vetykäyttöiset ajoneuvot. Tavarakuljetuksissa nollapäästöisiksi raskaiksi ajoneuvoiksi määritellään ajoneuvot, joiden kulutus on enintään 3 gCO₂/tonnikilometri (Euroopan parlamentti ja Euroopan unionin neuvosto 2024). Akku- ja polttokennokäyttöiset sähköiset ajoneuvot ovat ainoat ajoneuvot, joiden käytöstä ei synny päästöjä, sillä kaikilla polttomoottorikäyttöisillä ajoneuvoilla syntyy päästöjä huolimatta käytettävästä energianlähteestä (Cunanan ym. 2021). Asetetun päästörajan myötä vetykäyttöiset polttomoottoriajoneuvot voidaan sisällyttää päästöttömien ajoneuvojen luokkaan, vaikka niiden käytöstä voikin syntyä vähäisiä hiilidioksidipäästöjä ja typen oksideja hallitsevan päästöjenhallintajärjestelmän myötä (Mulholland 2024).

Nollapäästöisistä vaihtoehdoista kuitenkin ainoastaan akkukäyttöiset hyötyajoneuvot ovat laajalti kaupallisesti saatavilla ja hyödynnettävissä (Giuliano ym. 2021). Direktiivissä ei oteta huomioon energiantuotannossa syntyviä päästöjä, vaikka nollapäästöiset ajoneuvot ovat käytännössä päästöttömiä ainoastaan silloin, kun niiden käyttämä energia on tuotettu päästöttömästi (Cunanan ym. 2021). Nollapäästöisten ajoneuvojen määrittely mahdollistaa päästöjen vähentämiseen tähtääviä toimenpiteitä: EU on mm. suunnitellut sallivansa nollapäästöisille raskaille ajoneuvoille 44 tonnin maksimipainon yleisesti käytetyn 40 tonnin painorajan sijaan (Euroopan parlamentti 2024).

Direktiivissä 2024/1610 vähäpäästöisiksi raskaiksi ajoneuvoiksi määritellään ajoneuvot, joiden hiilidioksidipäästöt ovat alle puolet alaryhmän¹ kaikkien ajoneuvojen vertailupäästöistä, mutta jotka eivät päästöjensä puolesta sisälly nollapäästöisiin ajoneuvoihin (Euroopan parlamentti ja Euroopan unionin neuvosto 2024).

2.6 Uusiutuvien polttoaineiden päästöluokittelu

Biopolttoaineiden tuotantoon käytettävien viljelykasvien eli ns. ensimmäisen sukupolven raaka-aineiden käyttö voi aiheuttaa biodiversiteetin vähenemistä, synnyttää kasvihuonekaasupäästöjä vähentyvän metsäpinta-alan seurauksena ja uhata ruuantuotantoa (Transport & Environment 2024). Uusiutuvisissa polttoaineissa on korostettu siirtymää kohti ns. toisen sukupolven energianlähteitä ja muita kestäväällä tavalla tuotettuja edistyneitä polttoaineita. Edistyneet polttoaineet voidaan Unglertin ym. (2020) mukaan jakaa seuraavasti:

- Jäte- ja jäännösmateriaaleista valmistetut biopolttoaineet, jotka sisältävät mm. käytetystä ruokaöljystä tai eläinjätteestä valmistetun biodieselin, lignoselluloosasta tuotetun bioetanolin, vetykäsitteltyt käytetyt ruokaöljyt sekä anaerobisessa hajoamisprosessissa lannasta, oljesta ja jäännösmateriaaleista tuotetun biometaanin
- Synteettisesti tuotetut polttoaineet, jotka sisältävät mm. Fischer–Tropsch-menetelmällä hiilipitoisesta raaka-aineesta tuotetusta synteetikaasusta valmistetut polttoaineet (biomass-to-liquid tai biogas-to-liquid) sekä samalla prosessilla

¹ Raskaiden ajoneuvojen alaryhmät määritetään mm. ajoneuvon painon, rakenteen ja voimansiirron pohjalta (Euroopan parlamentti ja Euroopan unionin neuvosto 2024).

uusiutuvalla sähköllä tuotetusta vedystä valmistetut kaasumaiset tai nestemäiset e-polttoaineet (power-to-x, power-to-gas tai power-to-liquid)

- Maatalouden ulkopuolisista biologisista resursseista saadut biopolttoaineet, jotka sisältävät mm. levistä tuotetun biodieselin.

EU on määritellyt viimeisimmissä uusituvan energian direktiiveissä RED II:ssa ja RED III:ssa energiasisällöt ja päästöt biopolttoaineille ja edistyneille polttoaineille. Direktiiveissä korostetaan edellä mainittujen edistyneiden polttoaineiden roolia biopolttoaineiden tuotannossa. Edistyneille polttoaineille määriteltiin RED II:ssa erillinen 3,5 prosentin vähimmäisosuus liikenteen energiankulutuksesta vuoteen 2030 mennessä (Euroopan parlamentti ja Euroopan unionin neuvosto 2018). RED III:ssa tavoitetta nostettiin, ja se sisältää yhdistetyn 5,5 prosentin tavoitteen edistyneille biopolttoaineille ja uusiutuvasta vedystä tuotetuille ns. e-polttoaineille vuoteen 2030 mennessä (Euroopan parlamentti ja Euroopan unionin neuvosto 2023a). Direktiivin myötä esimerkiksi metsäteollisuudesta syntyvän biomassan hyödyntämiseen on vastaavasti tulossa kiristyksiä, sillä sen nähdään edesauttavan mm. vesien saastumista ja biodiversiteetin heikentymistä (Proskurina & Mendoza-Martinez 2023). On kuitenkin mahdollista, että Suomi täyttää maatason kestävyysvaatimukset metsäbiomassan kestävyyskriteerien osalta (Haavisto ym. 2024).

3 Raskaan tavaraliikenteen siirtymä vähäpäästöisiin kuljetuksiin

3.1 Raskaan tavaraliikenteen yleiskuvaus

Liikennesektorilla on huomattava merkitys yhteiskuntien ja talouden toiminnalle, ja se vaikuttaa huomattavasti niiden kehitykseen ja ihmisten hyvinvointiin. Myös kuljetusten tehokkaalla toiminnalla on positiivisia taloudellisia kerrannaisvaikutuksia, sillä toimivat liikennepalvelut mahdollistavat työllisyyden ja talouden kehityksen myös oman sektorinsa ulkopuolella (Rodrigue & Notteboom 2013). Taloudellinen toiminta toisaalta vaikuttaa merkittävästi liikennesektoriin, sillä positiiviset talouden suhdanteet lisäävät merkittävästi myös kuljetusten kysyntää ja päinvastoin (Meersman & Van de Voorde 2013).

Raskaalla tavaraliikenteellä on merkittävä rooli tavaroiden kuljetuksessa osana koko kuljetussektoria. Kuorma-autoilla voidaan kuljettaa monipuolisesti lähes kaikenlaisia lasteja lyhyillä ja keskipitkillä etäisyyksillä; niillä voidaan kuljettaa sekä suurempia yksittäisiä kuormia että pienempiä osakuormia, ja erilaisien ajoneuvojen avulla voidaan kuljettaa kiinteitä lähetyksiä, nesteitä tai kaasuja. Kuorma-autoliikenteessä voidaan kuljettaa meri- ja ilmaitse tehtäviä kuljetuksia pienempiä kuormia, mutta tieliikenteen vahvuutena on kuljetusten saavutettavuus, ajoneuvojen alhaiset pääomakustannukset ja kuljetusten nopeus (Rodrigue ym. 2013). Käytännössä kaikki kuljetuksia hyödyntävät yritykset käyttävät tiekuljetuksia osana toimitusketjuaan (Traficom 2025).

EU:n alueella kuljetettiin maantieliikenteessä vuonna 2023 yhteensä yli 13,2 miljardia tonnia rahtia, ja tonnikipilometreissä kuljetusten suoritemäärä oli 1 857 miljardia. Maantiekuljetusten määrä Euroopassa on kasvanut suhteessa vesi- ja rautateitse tehtyihin kuljetuksiin, ja maantiekuljetusten osuus on yli 50 prosenttia kaikista Euroopassa kuljetetuista tonnikipilometreistä. Maantiekuljetusten kokonaismäärän odotetaan edelleen kasvavan noin neljänneksellä vuoteen 2030 mennessä. Tonnikipilometreissä mitattuna merkittävimmät kuljetusluokat maantieliikenteessä Euroopassa olivat vuonna 2023 elintarvikkeet, useammasta osakuormasta koostuvat kappaletavarat sekä maa- ja metsätalouden tuotteet. (EEA 2022a; Eurostat 2024a).

Liikennekuljetusten luonne määrittelee ajoneuvon optimaalisen koon ja kapasiteetin: maantiekuljetuksissa suositaan raskaita ajoneuvoyhdistelmiä, kun taas kaupunkiympäristössä käytetään kuljetuksissa useammin pienempiä ja kevyempiä ajoneuvoja.

Ajoneuvojen korkea kuljetuskapasiteetti mahdollistaa tonnikilometreissä mitattuna alhaiset kustannukset, ja näin ollen kuljetuksissa vallitsee useimmiten suuruuden ekonomia: suurten tavaramäärien kuljettaminen vähentää kuljetuksen yksikkökustannuksia (Liimatainen ym. 2023). Pienemmissä kuljetettavissa suoritteissa ajoneuvon kapasiteetti kannattaa kuitenkin sopeuttaa tarpeen mukaan mahdollisimman tehokkaan toiminnan takaamiseksi. Raskaalle liikenteelle on lisäksi ominaista, että erilaiset kuljetusluokat voivat tarvita kuljetusten toteuttamiseksi erilaisia ajoneuvotyypppejä, kuten esimerkiksi säiliöajoneuvoja. (OECD 2011).

3.2 Käyttövoimien murros raskaassa liikenteessä

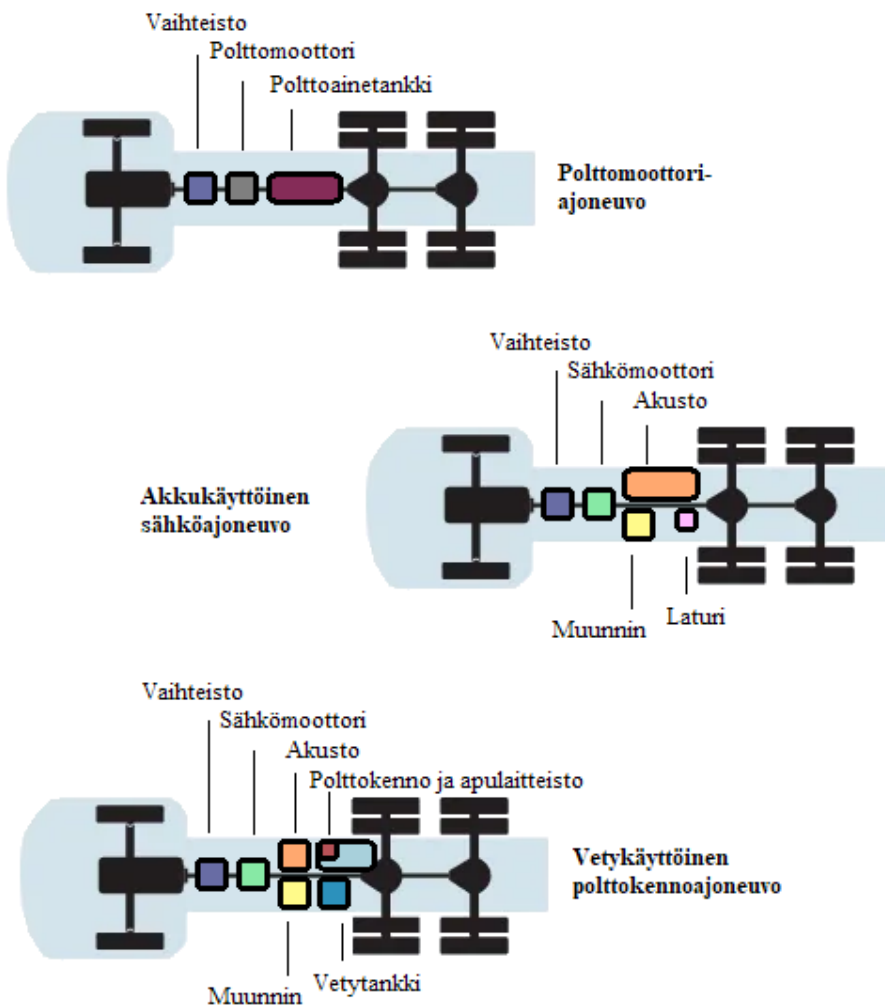
3.2.1 Käyttövoimien yleiskuvaus

Raskaan liikenteen edellyttämät vaatimukset voimalinjalle poikkeavat merkittävästi henkilöautoliikenteestä, jossa akkukäyttöiset sähköajoneuvot ovat nousseet ensisijaiseksi vaihtoehdoksi bensiinillä ja dieselillä kulkevien ajoneuvojen rinnalle (ACEA 2024b). Akkukäyttöisillä sähköajoneuvoilla on kuitenkin haasteita vastata raskaan kuljetuksen tarpeisiin erityisesti pitkien toimintasäteiden osalta (Shoman ym. 2023). Koska esimerkiksi Euroopan maantiiliikenteessä tehtävistä tavarankuljetussuoritteista noin kaksi kolmasosaa kuljetetaan yli 300 kilometrin etäisyydelle (Eurostat 2024b), raskaalle liikenteelle on suunniteltu useita erilaisia käyttövoimaratkaisuja dieselin korvaamiseksi.

Raskaassa tavaraliikenteessä yritysten toimintatavat ja -mallit poikkeavat merkittävästi toisistaan. Kuljettavissa tuotteissa, niiden määrissä ja kuljetusten pituuksissa on huomattavasti variaatiota eri kuljetusyriyten välillä, minkä myötä esimerkiksi pitkien matkojen kuljetuksissa ajoneuvojen tulee vastata erilaisiin tarpeisiin kuin pienemmällä säteellä kulkevien ajoneuvojen (Transport & Environment 2021b). Erilaisten toimintamallien myötä raskaalle liikenteelle ei välttämättä löydykään yksiselitteisesti parasta mahdollista ratkaisua: siinä missä pitkillä välimatkoilla voidaan hyödyntää polttomoottoria toimivia ajoneuvoja, pienemmällä säteellä operoivat ajoneuvot voivat hyötyä ladattavista sähköajoneuvoista (Breed ym. 2021). Hyödyntämällä erilaisia käyttövoimia eri käyttötarkoituksiin voidaan päästä myös kokonaispäästöjen kannalta parhaaseen lopputulokseen (Guerrero de la Peña ym. 2020). Käyttövoimien osalta on kuitenkin huomioitava, että ne tarvitsevat ympärilleen myös polttoaine- tai latausinfrastruktuurin (Pihlatie ym. 2023).

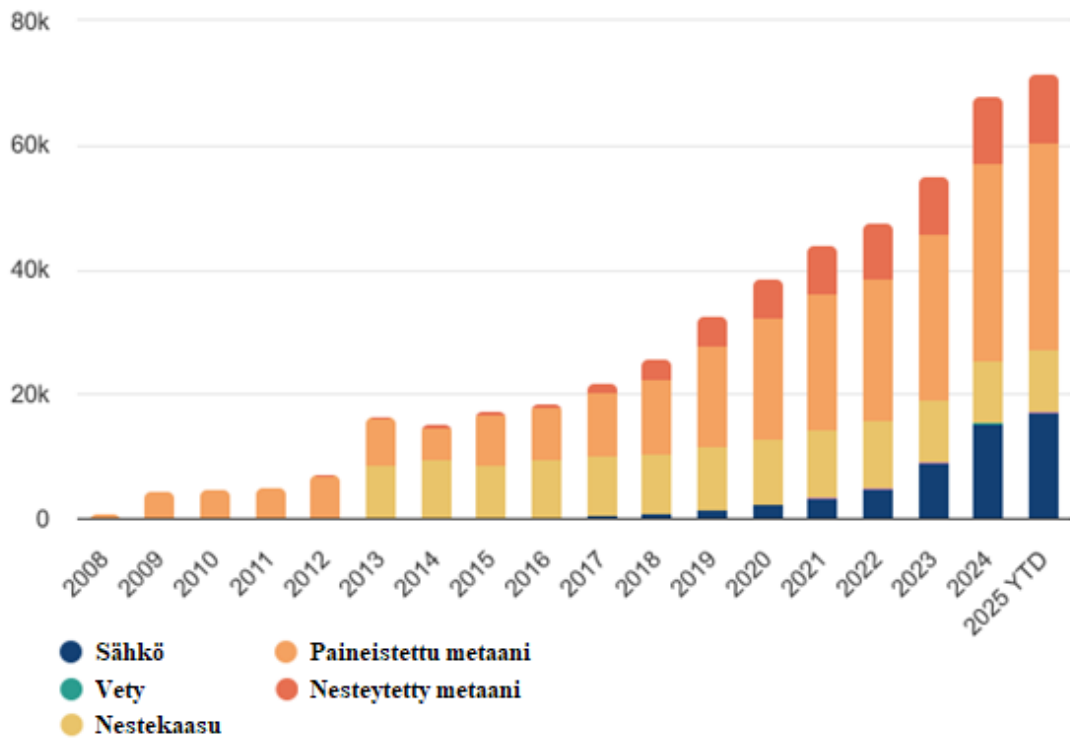
3.2.2 Voimalinjat

Polttomoottorit voidaan jakaa toimintaperiaatteelta kahteen päätyyppiin, eli puristusytytysmoottoreihin (compression ignition, CI) ja kipinäsytytys- eli ottomoottoreihin (spark ignition, SI). Suurin osa nykyisistä raskaan kaluston ajoneuvoista käyttää puristusytytyksellä toimivia dieselmootoreita, kun taas henkilöajoneuvoissa toimivat bensiinikäyttöiset ottomoottorit ovat suosittumia. Dieselmootoreiden ottomoottoria parempi hyötysuhde ja dieselpolttoaineen bensiiniä korkeampi energiasisältö mahdollistavat dieselmootorin korkean vääntömomentin ja alhaisen kulutuksen, mikä tekee siitä suosittumman käyttövoiman raskaalle kalustolle (Cunanan ym. 2021). Pitkän käyttöhistorian myötä dieselmootori on myös kehittynyt luotettavaksi voimalinjaksi (Osieczko ym. 2021). Vuonna 2023 EU:n alueella myydyistä yli 16 tonnin kuorma-autoista 96,5 prosenttia oli dieselkäyttöisiä (ACEA 2024a).



Kuva 3. Voimalinjojen toimintaperiaatteet. Mukailten (Smallbone ym. 2020)

Polttomoottoreissa voidaan edellä mainittujen nestemäisten fossiilisten polttoaineiden lisäksi käyttää myös useita muita kaasui- tai nestemuodossa olevia polttoaineita, kuten maa-kaasua, biometaania, biodieseliä, HVO-dieseliä, dimetyylieetteriä sekä vetyä (Peters ym. 2021). Näiden lisäksi ajoneuvoissa voidaan käyttää myös vedystä johdettavia synteettisiä ns. e-polttoaineita, kuten e-metaania, e-metanolia ja e-ammoniakkia (Ravi & Aziz 2022). Valtaosa nykyisin Euroopassa myydyistä ei-dieselkäyttöisistä raskaista polttomoottori-ajoneuvoista käyttää energianlähteenään metaanipohjaista kaasua. Kaasua käyttävien ajoneuvojen myyntiosuus vähintään 16 tonnin raskaista kuorma-autoista oli lähes 2,5 prosenttia vuonna 2023. (ACEA 2024a; European Alternative Fuels Observatory 2025).



Kuva 4. Vaihtoehtoisilla käyttövoimilla kulkevien raskaiden ajoneuvojen myynti Euroopassa vuodesta 2008 alkaen (European Alternative Fuels Observatory 2025)

Sähkökäyttöisissä ajoneuvoissa sähkömoottori muuntaa energian magneetin avulla mekaaniseksi energiaksi (Cunanan ym. 2021). Akkukäyttöisessä sähköajoneuvossa käytettävä sähköenergia varastoidaan akkuun ulkoisen latausjärjestelmän avulla (Shoman ym. 2023). Vuonna 2023 EU:n alueella myydyissä yli 16 tonnin kuorma-autoissa ladattavien sähköisten ajoneuvojen osuus myydyistä ajoneuvoista kolminkertaistui edellisvuodesta

ollen 0,9 prosenttia. (ACEA 2024a). Sähkömoottori voi saada energiansa myös polttokennosta, jolloin energianlähde eli yleisimmin vety tuodaan voimalinjaan ulkopuolelta (Peters ym. 2021). Ajoneuvoissa voidaan myös käyttää useampaa kuin yhtä edellä mainituista käyttövoimista, jolloin puhutaan hybridiajoneuvoista. (Lajevardi ym. 2019).

3.2.3 Päästötavoitteiden vaikutus vaihtoehtoisten käyttövoimien myyntiin

Ympäristövaatimusten kiristymisen ja päästövähennystavoitteiden vuoksi vaihtoehtoisten eli muiden kuin dieselkäyttöisten ajoneuvojen osuus on kasvanut viime vuosina (European Alternative Fuels Observatory 2025). EU:n asettamat kunnianhimoiset tavoitteet päästöjen vähentämiseksi edellyttävät kuitenkin nolla- ja vähäpäästöisten ajoneuvojen määrän nykyistä huomattavasti nopeampaa kasvua. Transport & Environmentin (2021b) mukaan nollapäästöisten raskaiden ajoneuvojen määrän osuuden tulisi kaikista ajoneuvoista nousta 40 prosenttiin vuoteen 2030 mennessä. Polttomoottoriajoneuvojen myyntin tulisi puolestaan loppua kokonaan pian vuoden 2035 jälkeen, mikäli tavoite nollapäästöisestä liikenteestä vuonna 2050 halutaan saavuttaa.

Euroopan merkittävimmät raskaiden ajoneuvojen valmistajat ovat osaltaan sitoutuneet näiden tavoitteiden saavuttamiseen. MAN on asettanut tavoitteekseen, että vuonna 2030 yrityksen myymistä pitkän matkan raskaista ajoneuvoista 40 prosenttia olisi nollapäästöisiä. Renault Trucks tavoittelee nollapäästöisten ajoneuvojen muodostavan 35 prosentin osuuden sen myymistä raskaista ajoneuvoista vuonna 2030. Ivecolla vastaava luku on 20 prosenttia ja Volvolla 19 prosenttia. (Transport & Environment 2021b). Daimler Truckin tavoitteena on nostaa nollapäästöisten ajoneuvojen osuus 50 prosenttiin Euroopassa myydyistä raskaista ajoneuvoista (Daimler Truck 2022). Lisäksi edellä mainitut valmistajat ovat yhdessä sitoutuneet myymään ainoastaan fossiilivapaita raskaita ajoneuvoja vuodesta 2040 eteenpäin (ACEA 2020).

3.3 Siirtymän haasteet

Vaihtoehtoisten käyttövoimien käyttööntoon liittyy merkittäviä haasteita, joita voidaan luokitella useilla eri tavoilla (Berkeley ym. 2017). Tässä tutkielmassa haasteita on arvioitu taloudellisuuden, teknologian, infrastruktuurin, yhteiskunnan ja ympäristön näkökulmista. Kaikilla tutkielmassa tarkasteltavilla käyttövoimilla on omat haasteensa raskaassa liikenteessä, ja jokainen käyttövoima kohtaa haasteita useasta edellä mainitusta

näkökulmasta. Näitä haasteita käydään seuraavaksi läpi yleisellä tasolla, ja tutkielmassa käsiteltäviä käyttövoimia haasteineen arvioidaan tarkemmin luvussa 4.

3.3.1 Taloudelliset haasteet

Tavaraliikenteelle on ominaista toimijoiden heikot taloudelliset marginaalit, jolloin siirtymisen vaihtoehtoihin käyttövoimiin koetaan merkittävänä taloudellisena riskinä. Kokonaiskustannuksilla ja mahdollisella kustannusrakenteen muutoksella on huomattava merkitys käyttövoimien käyttöönottoon. Kuljetusalan yrityksiä saadaan siirtymään uusiin käyttövoimiin parhaiten tekemällä siitä taloudellisesti kannattavaa. (Letkiewicz ym. 2023; Müller 2024). Anderhofstadtin ja Spinlerin (2020) mukaan hankinta- ja käyttökustannukset ovat yksi merkittävimmistä tekijöistä vaihtoehtoisella käyttövoimalla kulkevan raskaan ajoneuvon hankintapäätöstä tehdessä.

Vaihtoehtoisissa käyttövoimissa ajoneuvojen hankintakustannukset ovat huomattavasti dieseliä korkeammat, ja lisäksi käytön kokonaiskustannuksiin liittyy merkittäviä epävarmuuksia ajoneuvojen huoltojen, korjausten ja jälleenmyyntihintojen sekä polttoainekustannusten osalta. Korkeat hankintakustannukset edellyttävät pääoman sitomista ajoneuvoihin, ja alhaisemmista polttoainekustannuksista mahdollisesti saatava etu johtaa kustannuseron pienenemiseen vasta ajoneuvon elinkaaren lopussa (Berkeley ym. 2017). Toisaalta kustannusten arvioinnissa tulee ottaa huomioon myös dieselajoneuvojen käyttökustannusten kehitys erityisesti polttoaineiden osalta (Anderhofstadt & Spinler 2019), sillä dieselpolttoaineen ja uusiutuvien polttoaineiden hintaero määrittelee vaihtoehtojen lopullisen kustannusvaikutuksen (Frenzel ym. 2021). Käytännössä kokonaiskustannusten arviointi on kuitenkin erittäin haastavaa, sillä kustannusten muutoksia on vaikea ennakoida (Miller 2016).

Eri käyttövoimien kokonaiskustannukset kytkeytyvät tiiviisti niiden tekniseen kehitykseen ja tuotantomääriin, sillä tuotannon mittakaavaedut mahdollistavat ajoneuvoille alhaisemmat kustannukset. Siirtyminen uuteen käyttövoimaan tuo valmistajille kustannuksia, sillä valmistajien tulee kehittää valmistustapojaan, kouluttaa työntekijöitä ja suunnitella toimitusketjut osittain uudelleen. Kun tietty käyttövoima saa jalansijaa markkinoilla, vahvistuu sen kustannuskilpailukyky tällöin kilpaileviin vaihtoehtoihin verrattuna. Samalla siirtymä voi olla nopeampaa alueellisissa kuljetuksissa, joissa käyttöönoton haasteet ovat vähäisempiä erityisesti sähköisten ajoneuvojen osalta. (Transport & Environment 2021b; 2022).

Suurilla ja vakiintuneilla toimijoilla on usein paremmat taloudelliset edellytykset ottaa käyttöön uusia teknologioita kuljetuskalustossaan. Niillä on myös parempi ymmärrys erilaisista vaihtoehdoista käyttövoiman osalta (Frenzel ym. 2021).

3.3.2 Teknologiset haasteet

Raskaiden ajoneuvojen osalta tekniset haasteet liittyvät useimmiten siihen, missä määrin teknologia vastaa käyttäjien odotuksiin ja tarpeisiin (Berkeley ym. 2017). Dieselaajoneuvoja voidaan pitkän käyttöhistoriansa vuoksi pitää kehitysasteensa puolesta valmiina teknologiana, vaikka niiden kehitystyö onkin joissain määrin edelleen mahdollista (Delgado ym. 2017). Muilla voimalinjoilla on vielä teknologista kehitystyötä tehtävänä niin ajoneuvojen kuin osittain myös polttoaineiden laajamittaisen tuotannonkin osalta. Eri käyttövoimien kehityksessä on kuitenkin merkittäviä eroja; siinä missä raskaita kaasukäyttöisiä ajoneuvoja on jo pidempään ollut tarjolla eri valmistajilta (Transport & Environment 2021a) ja biokaasua tuotetaan tuhansissa tuotantolaitoksessa pelkästään Euroopassa (Prussi ym. 2019), vetyyn pohjautuvalla liikenteellä on useita merkittäviä teknologisia esteitä ratkaistavana vedyn laajamittaisesta tuotannosta lähtien (Aguilar & Groß 2022).

Uusiin teknologiaratkaisuihin liittyy päivittäiseen käyttöön liittyviä epävarmuustekijöitä mm. ajoneuvojen luotettavuuden, turvallisuuden ja käyttömukavuuden osalta. Vaihtoehtoihin käyttövoimiin perustuvien ajoneuvojen valinnassa näiden epävarmuustekijöiden poissulkeminen on ensisijaisen tärkeää, sillä kuljetusliikkeiden tulla olla varmoja teknologian käyttökelpoisuudesta. Näin ollen ajoneuvojen valmistajilta odotetaan myös korkeaa palvelutasoa tehokkaan käytön varmistamiseksi. (Anderhofstadt & Spinler 2019).

Teknologisia haasteita voivat aiheutua myös käyttövoimien erilaisista ominaisuuksista, sillä esimerkiksi akkukäyttöiset raskaat ajoneuvot voivat vaatia lataustaukoja työpäivän aikana (Berkeley ym. 2017). Mikäli käyttövoimalla on negatiivisia vaikutuksia esimerkiksi ajoneuvojen toimintasäteeseen tai kapasiteettiin liittyen, näitä vaikutuksia tulee pyrkiä lieventämään mukauttamalla yritysten toimintamalleja (Pihlatie ym. 2023), mikä voi edellyttää muutoksia kuljetuksiin esimerkiksi kaluston kokonaismäärää kasvattamalla. Olemassa olevien toimintamallien muuntaminen kuljetusten järjestelemiseksi voidaan kokea hankalaksi. Esimerkiksi Anderhofstadtin ja Spinlerin (2020) tekemä tutkimus rah-tia kuljettavista yrityksistä osoitti, että raskaissa ajoneuvoissa ajoneuvojen toimintasäde nähtiin merkittävimmäksi tekijäksi ajoneuvon valintaa tehdessä, ja myös lataukseen tai tankkaukseen käytettävällä ajalla oli suuri merkitys ajoneuvon hankintapäätöksessä.

Vaikka vaihtoehtoisten käyttövoimien teknologinen kehitys on tärkeää niiden yleistymisen kannalta, voi kehitys itsessään tuoda myös omat haasteensa. Mikäli teknologia kehittyy nopeasti, voidaan hankitun ajoneuvon teknologian nähdä myös vanhenevan vastaavalla nopeudella. Yritykset eivät halua hankkia ajoneuvoja, mikäli ne kokevat niiden kilpailukyvyn laskevan nopeasti. (Berkeley ym. 2017).

3.3.3 Infrastruktuurin haasteet

Infrastruktuurin haasteet voidaan jakaa energianlähteiden tuotantoon ja niiden jakeluun. Liikenteen sähköistyminen vaatisi merkittäviä investointeja sähkön tuotantoon sekä sähköverkkoihin (Shoman ym. 2023), ja biopolttoaineiden tuotanto taas edellyttää biopolttoaineteollisuuden kehittämistä ja toimitusketjun parempaa suunnittelua (Danielis ym. 2022). Polttokennoteknologian lisäksi useimpien muiden vähäpäästöisten energianlähteiden laajamittainen käyttö metaania hyödyntävistä kaasujoneuvoista alkaen nojautuu puolestaan vahvasti vetyyn ja vedystä johdettavien power-to-x-prosessien hyödyntämiseen polttoaineiden valmistamiseksi. Teknologia ei vedyn tuotannossa ja muuntamisessa ole kuitenkaan vielä sillä tasolla, että laajamittainen tuotanto ja samalla infrastruktuurin rakentaminen olisi mahdollista. (Ravi & Aziz 2022; Nemmour ym. 2023; Sens ym. 2024).

Ajoneuvojen käyttövoiman ja lataus- ja tankkausinfrastruktuurin välillä on nähtävissä niin sanottu kanan ja munan ongelma, joka rajoittaa uusien käyttövoimien yleistymistä. Käyttövoiman yleistymisen edellytyksenä on sen käyttöä tukeva lataus- tai tankkausinfrastruktuuri, mutta toisaalta merkittäviä taloudellisia panostuksia edellyttävän infrastruktuurin rakentaminen ei ole mielekästä, ellei sille ole käyttäjiä (Berkeley ym. 2017; Frenzel ym. 2021). Käytännössä puutteellinen polttoaineiden tai sähkön jakeluinfrastruktuuri aiheuttaa merkittäviä haasteita lähes kaikille vaihtoehtoisille raskaan käyttövoimille (Osieczko ym. 2021), sillä ainoastaan HVO-dieselin (hydrotreated vegetable oil) jake-lussa voidaan hyödyntää nykyistä infrastruktuuria (Takman & Andersson-Sköld 2021).

Infrastruktuuria koskevia päätöksiä tehtäessä on kuitenkin tärkeää huomioida, että tietyn käyttövoiman yleistymiseksi tehtävät investoinnit voivat jäädä arvottomiksi, mikäli käyttövoima ei saakaan toivottua jalansijaa markkinoilla. Kuitenkin EU:n liikenteen kasvihuonepäästöjen vähentämiseksi luodut strategiat sisältävät oletuksen infrastruktuurin kokonaisvaltaisesta kehittämisestä uusien energialähteiden hyödyntämiseksi (Siskos ym. 2018). Infrastruktuurin kehittäminen voidaan aloittaa usein alueellisten ratkaisujen

luomisesta. Suurimpien kuljetusyritysten kuljetukset ovat keskittyneet tietyille reiteille, mikä helpottaa suurten yritysten hyödyntämistä erilaisissa pilotointihankkeissa uusien käyttövoimien osalta (Frenzel ym. 2021).

3.3.4 Yhteiskunnalliset haasteet

Yhteiskunnalla voi olla merkittävä vaikutus siirtymässä käyttövoimiin, joiden ympäristövaikutukset ovat mahdollisimman vähäisiä. Siirtymää tukevat toimenpiteitä voivat olla teknologian kehitystä tukevat tutkimus- ja kehitystuet, investoinnit infrastruktuuriin sekä avustusten, verohyvitysten tai alennusten muodossa myönnetyt hankintaedut nykyistä vähäpäästöisemmille ajoneuvoille. Tukitoimenpiteillä ja teknologian kehittämällä voi olla huomattava merkitys käyttövoimien kustannuskilpailukykyyn ja sitä kautta ympäristöystävällisempien käyttövoimien valintaan. (Müller 2024). Samalla näitä vähäpäästöisiä ajoneuvoja tukevia hankintaetuja voidaan kompensoida nostamalla suuripäästöisten ajoneuvojen kustannuksia verotuksen avulla (Berkeley ym. 2017).

EU:lla on päästöjä ohjaavien toimenpiteiden (ks. luku 2) lisäksi erilaisia keinoja siirtymän tukemiseksi. Esimerkiksi asetus (EU) 2023/1804 määrittelee tavoitteet vaihtoehtoisten polttoaineiden infrastruktuurin käyttöönotolle (Euroopan parlamentti ja Euroopan unionin neuvosto 2023b), EU:n sosiaalinen ilmatorahasto mahdollistaa nollapäästöisten raskaiden hyötyajoneuvoja tukemisen (Euroopan parlamentti ja Euroopan unionin neuvosto 2024), ja REPowerEU-hankkeen tarkoituksena on tukea siirtymää kohti kestäväää energiantuotantoa (Euroopan komissio 2024e). Lisäksi EU rahoittaa erilaisia käyttövoimien siirtymää tukevia hankkeita, kuten ESCALATE-projektia, jonka avulla pyritään luomaan toteuttamiskelpoisia ratkaisuja yli 800 kilometrin kantaman saavuttaville nollapäästöisille raskaille ajoneuvoille (ESCALATE 2024).

EU:n asettamat tavoitteet ja toimenpiteet ovat herättäneet myös kritiikkiä. Esimerkiksi Osieczkon ym. (2021) ja Müllerin (2024) mukaan EU:lta puuttuvat selkeät strategiat kunnianhimoisten tavoitteiden saavuttamiseksi rakenteellisten uudistusten avulla. Kuitenkin EU:n asettamat asetukset ja tavoitteet on määritelty useimmiten siten, että jäsenmaiden tehtävänä on määrittellä tarkemmat toimenpiteet tavoitteiden saavuttamiseksi. Koska EU:n jäsenvaltioilla on keskenään erilaiset edellytykset siirtymän toteuttamiseen, määriteltyjen tavoitteiden tulisi kohdella maita mahdollisimman tasapuolisesti. Toisaalta myös jäsenmaiden tekemien päätösten tulisi olla keskenään samassa linjassa, sillä eriarvoiset

tukitoimenpiteet esim. biopolttoaineiden tuotannossa voivat tuoda epäreilua kilpailuetua eri maissa toimivien yritysten välille (Takman & Andersson-Sköld 2021).

3.3.5 Ympäristöhaasteet

Siirtymässä on tärkeää tarkastella myös päästöjä mahdollisimman laajana kokonaisuutena. Akkukäyttöisten ajoneuvojen päästöihin vaikuttaa merkittävästi sähkön tuotannossa syntyvät kokonaispäästöt, jolloin fossiilisella energianlähteillä tuotetulla sähköllä kulkevan ”nollapäästöisen” ajoneuvon hiilidioksidipäästöt voivat olla dieselajoneuvoa suuremmat (Machado ym. 2020). Toisaalta taas esim. maantieliikenteessä käytetyt biopolttoaineet ovat pois muiden liikennemuotojen, kuten lento- ja laivaliikenteen käytöstä, joissa niiden vähennyspotentiaali voisi olla suurempi (Transport & Environment 2021a).

Polttomoottoreiden päästöissä otetaan yleensä huomioon ainoastaan pakoputkista syntyvät päästöt. Kuitenkin esimerkiksi kaasukäyttöisissä ajoneuvoissa polttoainetta voi päästä merkittäviä määriä myös ei-pakoputkilähteistä, mutta näitä päästöjä ei ole otettu huomioon raskaan kaluston ajoneuvojen standardeissa eikä niiden vaikutusta ilmastoon tällä hetkellä säädellä (Transport & Environment 2021a).

Raskaiden autojen päästöjen leikkaamiseen kohdistuvat toimenpiteet EU:n alueella keskittyvät ajoneuvokohtaisten päästöjen vähentämiseen vähäpäästöisemmän teknologian avulla. Tämän takia määritetyt toimenpiteet eivät juurikaan vaikuta kuljetusten kokonaismäärän kehitykseen, sillä ne eivät luo kannusteita muutoksiin varsinaisissa kuljetusmuodoissa. Tällöin toimenpiteet eivät tuo muutoksia myöskään rekisteröitävien ajoneuvo-luokkien osuuksiin myytävien ajoneuvojen osalta (Siskos & Moysoglou 2019).

Ympäristöystävällisten ajoneuvojen ensimmäiset omaksujat raskaan liikenteen osalta ovat usein suuria toimijoita, jotka pyrkivät toimimaan vastuullisesti tai ainakin luomaan itsestään sellaista imagoa (Seitz ym. 2015). Kuitenkin mm. Anderhofstadtin ja Spinlerin (2019; 2020) havainnot osoittavat, että taloudellisilla vaikutuksilla on käyttövoiman valinnassa merkittävästi ympäristövaikutuksia suurempi painoarvo.

4 Käyttövoimat raskaassa liikenteessä

Raskaissa ajoneuvoissa voidaan hyödyntää voimansiirrossa eri käyttövoimia. Käyttövoimien välillä on merkittäviä eroja niiden kustannusten, toimintaperiaatteiden, ominaispiirteiden ja teknologisen kehityksen osalta. Tässä luvussa tarkastellaan tutkimuksessa vertailtavien käyttövoimien ja niiden polttoaineiden ominaisuuksia, soveltuvuutta ja kehityksen tilaa raskaiden kuorma-autojen osalta. Käyttövoimien kustannusrakennetta tarkastellaan tarkemmin luvussa 6 tehtävän kustannuslaskennan yhteydessä.

4.1 Diesel

4.1.1 Käyttövoiman perusteet

Dieselkuorma-autot käyttävät perinteistä voimalinjaa, jossa puristusytytteen dieselmoottori välittää tehoa vaihteistolle ja edelleen vetäville pyörille. Moottori on myös liitetty laturiin, joka siirtää energiaa akkuun. Akun sisältämää virtaa käytetään ajoneuvon sähköisiin lisälaitteisiin ja moottorin käynnistämiseen. (Cunanan ym. 2021; Tol ym. 2022). Raskaan dieselajoneuvon voimansiirron kokonaispaino on noin 1700 kg sisältäen mm. dieselmoottorin, polttoainesäiliön, pakokaasujen jälkikäsittelyjärjestelmän ja Ad-Blue-säiliön (Mareev ym. 2018). Voimansiirron ja polttoaineen vaatima paino on huomattavasti vähemmän kuin useimmilla muilla käyttövoimilla, mikä mahdollistaa dieselajoneuvolla tehtäville kuljetuksille suuremman nettokapasiteetin.

Diesel toimii energianlähteenä lähes 98 prosentille liikenteessä kulkevista raskaista ajoneuvoista. Raskaiden dieselajoneuvojen pitkän kehitys- ja käyttöhistorian myötä niiden vahvuutena on luotettavuus ja pitkä käyttöikä uudempiin teknologioihin verrattuna (Osieczko ym. 2021). Dieselajoneuvot ovat erityisesti hankintakustannuksiltaan muita käyttövoimia edullisempia, ja kustannukset nähdäänkin merkittävimpänä esteenä vaihtoehtoisiin käyttövoimiin siirtymisessä (Anderhofstadt & Spinler 2019). Koska raskas liikenne perustuu lähes täysin dieselin käyttöön, on tarjolla oleva raskaan liikenteen polttoaineinfrastruktuuri rakentunut sen jakeluun (Cunanan ym. 2021) Samalla infrastruktuurin puute on merkittävänä esteenä muiden käyttövoimien hyödyntämiseen raskaassa liikenteessä (Anderhofstadt & Spinler 2019).

Dieselajoneuvoissa ainoastaan 23 prosenttia polttoaineen energiasta siirtyy ajoneuvon liikkuttamiseen ja valtaosa polttoaineen energiasta muuttuu lämmöksi. Raskaan dieselajoneuvon energiankulutus on keskimäärin noin 3,33 kWh/km eli noin 2,5-kertainen akkukäyttöiseen ajoneuvoon verrattuna. Heikko hyötysuhde vaikuttaa kuitenkin osaltaan siihen, että polttoaineen kulutus kasvaa ajoneuvon kokonaispainon ja samalla tarvittavan tehon kasvaessa suhteellisesti vähemmän kuin sähkömoottoria hyödyntävillä raskailla ajoneuvoilla. (Mareev ym. 2018; Lombardi ym. 2020). Polttoaineen palamisesta lämmöksi haihtuvaa energiaa voidaan puolestaan hyödyntää ajoneuvon lämmittämisessä (Tol ym. 2022).

Dieselpolttoaineen vahvuus suhteessa muihin polttoaineisiin on sen korkea energiatiheys. Dieselin energiatiheys on noin 38,6 MJ/l, kun esimerkiksi litiumioniakkujen energiatiheys vaihtelee välillä 0,3–0,6 MJ/l. Tällöin samaan tilavuuteen mahtuu huomattavasti enemmän energiaa dieselpolttoaineissa kuin akuissa. (Shahzad & Cheema 2024). Raskaiden dieselajoneuvojen toimintasäteeseen vaikuttaa kuorman määrä, liikennöitävä ympäristö ja polttoaineen määrä ajoneuvossa. Mikäli ajoneuvon polttoaineenkulutus on noin 43 litraa 100 kilometrillä, voidaan 900 litran tankilla saavuttaa yli 2000 kilometrin toimintasäde.

4.1.2 Ympäristövaikutukset

Raskaan liikenteen osuus Euroopan tieliikenteen kokonaispäästöistä on 28 prosenttia (Mulholland 2024), ja näistä päästöistä 73 prosenttia aiheutui dieseliin tukeutuvien kuorma-autojen käytöstä (Euroopan komissio 2024b). EU:n raskaille ajoneuvoille asettamat päästörajat edellyttävät dieselajoneuvojen korvaamista vähäpäästöisillä vaihtoehdoilla (Basma ym. 2021a). Dieselajoneuvojen korkeat päästöt johtuvat osittain poltto-moottorin heikosta hyötysuhteesta, jonka myötä niiden well-to-tank-päästöt nousevat korkeiksi (Shahzad & Cheema 2024)

Dieselin tuotanto aiheuttaa noin 20 prosenttia raskaiden dieselajoneuvojen polttoainepäästöistä ja loput kokonaispäästöistä syntyy ajoneuvojen käytöstä (Joint Research Centre 2020). Tuotannossa suurimmat päästöt syntyvät raakaöljyn tuotantoon käytetystä energiasta ja tuotannon sivutuotteena syntyvän maakaasun soihdutuksesta. Tuotannon lisäksi päästöjä syntyy öljyn jalostamisesta dieseliksi, joka vaatii myös merkittävästi energiaa (Joint Research Centre 2014).

Merkittävimmät dieselajoneuvojen aiheuttamat päästöt ovat hiilidioksidi, typen oksidit sekä pienhiukkaset (PM) (Cunanan ym. 2021). Edellä mainituille päästöille, kuten myös käytöstä syntyville hiilimonoksidille, hiilivedylle, metaanille ja ammoniakille on määritelty EU:ssa raja-arvot raskaan liikenteen päästöjen vähentämiseksi ja ilmanlaadun parantamiseksi (Euroopan parlamentti ja Euroopan unionin neuvosto 2011), jolloin ajoneuvovalmistajia on edellytetty alentamaan ajoneuvojen aiheuttamia päästöjä. Uusimman Euro VI -standardin mukaiset raskaat ajoneuvot ovat kuitenkin tuottaneet enemmän N_2O -päästöjä kuin vanhemmat ajoneuvot johtuen pakokaasujen jälkikäsittelyjärjestelmien, kuten AdBlue-urealiuosta hyödyntävän SCR-järjestelmän käytöstä NO_x -päästöjen hillitsemiseksi (Transport & Environment 2021a).

Raskaiden dieselajoneuvojen kehittäminen nykyistä vähäpäästöisemmiksi on tärkeää kokonaispäästöjen vähentämiseksi, sillä dieselajoneuvojen määrä liikenteessä ei tule väheneään äkillisesti (Breed ym. 2021). Kokonaispäästöjä voidaan vähentää parantamalla dieselajoneuvojen polttoainetehokkuutta tai vähentämällä niiden käytöstä aiheuttamia päästöjä (Cunanan ym. 2021). Breedin ym. (2021) mukaan dieselkäyttöisten ajoneuvojen päästöjä voitaisiin laskea maksimissaan 22 prosenttia mm. kehittämällä moottoreita vähäpäästöisemmiksi, tehostamalla voimansiirtoa, parantamalla ajoneuvojen aerodynaamiikkaa, keventämällä ajoneuvon painoa ja vähentämällä renkaiden vierintävastusta. Giuliano ym. (2021) arvioivat, että raskaiden dieselajoneuvojen yksikkökohtaiset päästöt vähenevät 20 prosenttia vuosien 2020 ja 2030 välillä. Breed ym. (2021) arvioivat, että tiukentuvien päästörajoitusten myötä raskaan liikenteen kokonaispäästöt saattavat kuitenkin väliaikaisesti jopa kasvaa, kun kehitystyö vähäpäästöisempien dieselajoneuvojen kehittämiseksi vähenee ja suurin osa myydyistä ajoneuvoista on edelleen dieselajoneuvoja.

Kylmien olosuhteiden vaikutus päästöihin voi olla merkittävä, sillä moottorin kylmäkäynnistyksen yhteydessä uusissa raskaissa dieselajoneuvoissa on mittauksissa havaittu kymmenkertaisia NO_x -päästöjä käynnistystä seuraavan 15 minuutin aikana. Tämä selittyy ensisijaisesti sillä, että katalysaattorijärjestelmä vaatii toimiakseen tietyn lämpötilan. (Mendoza-Villafuerte ym. 2017).

4.2 HVO-diesel

4.2.1 Käyttövoiman perusteet ja kehityksen nykytila

Dieselajoneuvoihin sopivia polttoaineita voidaan valmistaa fossiilisen polttoaineen lisäksi uusiutuvista energialähteistä. Biopohjaisista polttoaineista biodieseliä ja HVO-dieseliä voidaan käyttää nykyisissä dieselajoneuvoissa (Mulholland ym. 2018), ja lisäksi tulevaisuudessa dieseliä voidaan tuottaa synteettisesti vedyn avulla (Aguilar & Groß 2022). Biodieselin ja HVO-dieselin valmistukseen voidaan käyttää paljolti samoja raaka-aineita, mutta ne eroavat toisistaan tuotantotavaltaan tai käyttömahdollisuuksiltaan.

Biodieselillä tarkoitetaan pääasiassa rasvahappometyyliesteriin (FAME, fatty acid methyl ester) pohjautuvia biopolttoaineita, joita voidaan käyttää pieninä, yleisimmin alle 20 prosentin (B20) pitoisuuksina dieselpolttoaineseoksissa (Osorio-Tejada ym. 2017; Mulholland ym. 2018). Rasvahappometyyliesteripohjaisen biodieselin osuus voi olla polttoaineseoksessa korkeintaan 30 prosenttia, eli sitä ei voida käyttää sellaisenaan nykyisissä dieselajoneuvoissa (Osorio-Tejada ym. 2017). Puhtaan biodieselin käyttö ajoneuvoissa on mahdollista, mutta se edellyttää muutoksia käytettävään moottoritekniikkaan (Mulholland ym. 2018). Biodieselin muuntaminen erityisesti erilaisista öljykasveista on melko yksinkertaista, minkä takia se on pisimpään käytössä ollut biopolttoaine (Unglert ym. 2020). Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivin (EU) 2018/2001 mukaisesti uusiutuvista lähteistä peräisin olevan energian osuutta tulee asteittain lisätä. Suomessa on määritelty vuodelle 2024 13,5 prosentin jakeluelvoite biopolttoaineille. Tavoitteen saavuttamiseksi biopohjaisia polttoaineita sisällytetään myös fossiilisiin polttoaineisiin (Työ- ja elinkeinoministeriö 2023a), jolloin biodieseliä sekoitetaan dieseliin ja vastaavasti bioetanolia sekoitetaan bensiiniin (Euroopan komissio 2020).

HVO-dieseliä eli uusiutuvaa dieseliä (renewable diesel) voidaan sen sijaan käyttää sellaisenaan (HVO100) rajoituksetta nykyaikaisissa dieselmoottoreissa (Mulholland ym. 2018), minkä vuoksi sitä tarkastellaan tässä tutkielmassa lähemmin vaihtoehtoisena käyttövoimana. HVO-diesel on vetykäsiteltyä kasvi- tai eläinpohjaista öljyä. Käsittelyssä biopohjaiset öljyt ja rasvat reagoivat vedyn kanssa korkeassa paineessa 300–400 celsiusasteen lämpötilassa, ja syntyvä öljy vastaa hiilirakenteeltaan öljypohjaista dieseliä. Nykyään uudistuvaa dieseliä tuotetaan yhä enemmän elintarviketeollisuuden jäte- ja jäämärasvoista (Linjala ja Kajolinna 2023), jonka takia HVO-nimitys antaa energialähteestä

osittain virheellisen kuvan. Biopohjaisuudestaan huolimatta HVO-dieselin säilyvyys on vähintään 15 vuotta (Neste 2020a).

HVO-dieselin suhteellinen osuus biopohjaisista polttoaineista on toistaiseksi melko vähäinen. Vuonna 2018 se oli EU:ssa ainoastaan kolme prosenttia kaikista uusiutuvista lähteistä saatavista polttoaineista. Biodieselin osuus oli 71 prosenttia ja bioetanolin 15 prosenttia (Danielis ym. 2022). Suomessa HVO-dieseliä on kuitenkin laajalti tankattavissa eri toimijoiden asemilta (Neste 2024a; St1 2024).

Uusiutuvan dieselin käyttöönotto nykyisissä ajoneuvoissa on helposti toteutettavissa, sillä sen jakeluun sopiva infrastruktuuri on jo olemassa. HVO-dieselillä on myös dieselin edut valmiin ajoneuvoteknologian ja toimintasäteen osalta (Peters ym. 2021). HVO-dieseliä voidaan sekoittaa tavalliseen dieseliin tai käyttää sellaisenaan useimmissa dieselajoneuvoissa (Takman & Andersson-Sköld 2021). Tästä huolimatta se ei ominaisuuksiltaan ole kuitenkaan täysin identtinen maaöljypohjaisen dieselin kanssa. Diesel on HVO-dieseliä tiheämpää, jonka vuoksi HVO-dieselin kulutus kilometriä kohden on arviolta 2–3 prosenttia suurempaa kuin dieselillä HVO-dieselin paremmista palamisominaisuuksista huolimatta (Neste 2020a).

4.2.2 HVO-dieselin tuotanto

Biopohjaisten polttoaineiden valmistuksessa käytetyt energianlähteet voidaan jakaa niiden vastuullisuuden mukaan ensimmäisen ja toisen sukupolven energianlähteisiin (ks. luku 2.6). HVO-dieseliä voidaan tuottaa vastuullisesti myös toisen sukupolven raaka-ainesta, mutta tuotantoa rajoittaa näiden raaka-aineiden vähäisyys. Viime vuosien aikana edistyneiden ja jäteperäisten raaka-aineiden käyttö on kasvanut merkittävästi, ja vuonna 2022 ne vastasivat 40:ää prosenttia kaikista vuonna 2022 kulutetuista biopolttoaineista EU:n alueella. Merkittävimpiä RED III:ssa määriteltyjä, vastuullisesti tuotettuja raaka-aineiden lähteitä biopolttoaineille olivat käytetty ruokaöljy, eläinrasvat ja teollisuuden jätteet, kuten palmujätevesiliete ja metsätalouden jätteet. (Transport & Environment 2024).

Käytettyä ruokaöljyä voidaan kerätä kotitalouksista tai ravitsemusalalta, ja se on merkittävin uusiutuvan dieselin raaka-aine EU:ssa. Suurin osa eurooppalaisissa yrityksissä käytetystä ruokaöljystä hyödynnetään polttoaineiden valmistuksessa. Tästä huolimatta

Euroopassa hyödynnettävästä käytetystä ruokaöljystä noin 80 prosenttia on peräisin Euroopan ulkopuolelta (Transport & Environment 2024).

Eläinrasvaa syntyy teurastamoilta lihantuotannon sivutuotteena (Soam & Hillman 2019). Valtaosa näistä rasvoista jo tällä hetkellä biopolttoaineiden valmistuksessa, kun niitä aiemmin käytettiin lähinnä energian- ja lämmöntuotantoon (Transport & Environment 2024).

Palmujätevesiliete (Palm Oil Mill Effluent, POME) on palmuöljyn prosessoinnista syntyvää jätevettä, joka on haitallista ympäristölle. Liete sisältää öljypalmun hedelmien ravinteita, palmukuitua ja öljyä, ja sitä voidaan muuntaa uusiutuvaksi dieseliksi tai biokerosiiniksi muiden öljypohjaisten raaka-aineiden tavoin. (Neste 2024a; Transport & Environment 2024). Palmujätevesilietettä voidaan hyödyntää biopohjaisten polttoaineiden lisäksi myös biokaasun tuotannossa (Transport & Environment 2024).

Palmuöljyn tuotannosta saadaan lisäksi **palmuöljyn rasvahappotislettä** (Palm Fatty Acid Distillate, PFAD), jota syntyy palmuöljystä muodostuvien vapaiden rasvahappojen seurauksena (Rainforest Foundation Norway 2023). Sen asema vastuullisena energianlähteenä on kuitenkin kiistelty, sillä vaikka mm. PFAD:tä HVO-dieselin tuotannossaan hyödyntävä Neste arvioi sen vastaavan RED III:ssa määriteltyä prosessitähdettä ollen tuotannosta syntyvää jätettä (Neste 2024a), voidaan se vastaavasti luokitella myös huonolaatuiseksi palmuöljyksi (Transport & Environment 2024). Palmuöljyn rasvahappotisleen osuus palmuöljyn tuotannosta on 4–5 prosenttia, ja tämän vuoksi sen käytön voidaan nähdä vaikuttavan epäsuorasti viljelypinta-alan laajenemiseen. Tämän vuoksi mm. Ruotsissa PFAD on rajattu vastuullisesti tuotettujen raaka-aineiden ulkopuolelle sen käytön vähentämiseksi (Soam & Hillman 2019). Palmuöljyn rasvahappotislettä voidaan käyttää myös muihin käyttötarkoituksiin, kuten raaka-aineena saippuan valmistamisessa, eläinten rehuna tai kemianteollisuudessa (Boonrod ym. 2017).

Metsätalouden tähteisiin sisältyy metsäteollisuudesta syntyviä selluloosapohjaisia raaka-ainejätteitä, kuten puiden oksia, neulasia ja sahanpurua. Eri tähteitä voidaan hyödyntää myös paperiteollisuudessa, energiateollisuudessa tai biomateriaalien tuotannossa (Transport & Environment 2024). Metsätalouden tähteet saattavat syntyä myös myöhemmistä metsäteollisuuden prosesseista, ja esim. UPM:n tehtailta sellun tuotannon sivutuotteena syntyvää mäntyöljyä käytetään HVO-dieselin valmistuksessa (Linjala & Kajolinna 2023).

Uusiutuvaa dieseliä voidaan valmistaa myös **biohajoavista yhdyskunta- ja teollisuusjätteistä**, joka on pääasiassa sekajätteestä eroteltua orgaanista kotitalousjätettä sekä sellaista biomassaa, joka ei ole hyödynnettävissä elintarvikkeiden tai rehujen valmistuksessa (Transport & Environment 2024).

4.2.3 Ympäristövaikutukset

HVO-dieselin kokonaispäästöjen vähennys muodostuu ympäristölle haitallisten raaka-aineiden käytöstä syntyvistä negatiivisista päästöistä. Käytetty raaka-aine vaikuttaa merkittävästi HVO-dieselin kokonaispäästöihin, ja kokonaispäästöjen vähennys syntyy ympäristölle haitallisten raaka-aineiden käytöstä syntyvistä negatiivisista päästöistä (Neste 2020a). HVO-dieselin käytöstä mitattavat kokonaispäästöt vaihtelevat merkittävästi raaka-aineiden välillä: Neste (2020a) arvioi uusiutuvan dieselin vähentävän kasvihuonepäästöjä 50–90 prosenttia perinteiseen dieseliin verrattuna. HVO-dieselin valmistamisesta ja käytöstä syntyneiden päästöjen arviointi on kuitenkin hankalaa, sillä erilaisilla mittareilla toteutetut tutkimukset voivat antaa elinkaaren aikana syntyneistä kasvihuonepäästöistä erilaisia tuloksia (Fajri ym. 2023), minkä vuoksi näkemykset biopolttoaineiden merkityksestä liikenteen kokonaispäästöjen vähentämiseksi eivät ole yhteneväisiä (Danielis ym. 2022).

Ensimmäisen sukupolven raaka-aineet, kuten palmu- ja rypsiöljy, synnyttävät huomattavasti suuremmat päästöt kuin toisen sukupolven raaka-aineet, sillä ensimmäisen sukupolven raaka-aineiden kokonaispäästöt koostuvat myös mm. tuotantoon käytetystä lannoitteista, sähköstä ja polttoaineesta (Soam & Hillman 2019). Tällöin tulee ottaa huomioon myös vaikutukset maan hedelmällisyyteen ja hiilinielupotentiaalin menettäminen (de Blas ym. 2020). Toisen sukupolven raaka-aineiden päästöt ovat alhaisemmat, koska niiden raaka-aineet syntyvät mm. maa- ja metsätalouden sivuvirroista, jolloin niiden tuottamiseen syntyneitä päästöjä ei oteta huomioon (Soam & Hillman 2019).

Biopolttoaineiden haasteena on päästöjen arviointi pakoputkesta, jolloin polttoaineiden päästöt määritellään korkeaksi (Lajevardi ym. 2019). Nesteen (2020a) mukaan HVO-dieselin käytöstä aiheutuvat päästöt eivät ole merkittävästi dieseliä pienempiä. Nan ym. (2015), Singern ym. (2015) ja Unglertin ym. (2020) arvioissa HVO-dieselin käytössä syntyvien hiilivetyjen, hiilimonoksidin ja pienhiukkasten päästöt ovat 0–20 prosenttia alhaisemmat kuin dieselpolttoaineeseen. Korkeampi palamislämpötila saattaa johtaa päästöjen nousuun typpioksidipäästöissä, mutta raskaiden ajoneuvojen päästöissä on mitattu myös

dieseliä alhaisempia päästölukemia (Boonrod ym. 2017). Boonrod ym. (2017) huomauttavat, että koska HVO-dieselin valmistuksessa käytetään vetyä, myös vedyn valmistuksessa käytetyillä raaka-aineilla on vaikutusta kokonaispäästöihin

ICCT:n arvion mukaan palmujätevesilietteen käytöstä syntyvät kokonaispäästöt ovat 27 grammaa CO₂-eq/MJ (Transport & Environment 2024). Yhdyskunta- ja teollisuusjätteistä syntyvien päästöjen arvioidaan olevan noin 30 grammaa CO₂-eq/MJ, mikäli jätteen oletetaan koostuvan 20 prosenttisesti fossiilisista jätteistä. Käytetyn ruokaöljyn päästöt ovat 11 g CO₂-eq/MJ, eläinrasvojen päästöt noin 15 grammaa CO₂-eq/MJ (Transport & Environment 2024) ja maissin varsista valmistetun HVO-dieselin päästöt 21,4 grammaa CO₂-eq/MJ (Larnaudie ym. 2020). Dieselin hiilidioksidipäästöt ovat arvioilta 91 grammaa CO₂-eq/MJ (Larnaudie ym. 2020), jolloin edellä luetelluista raaka-aineista valmistettavan HVO-dieselin kokonaispäästöt olisivat 61–88 prosenttia normaalia dieseliä alhaisemmat. Sen sijaan palmuöljyn rasvahappotisleen käytöstä syntyvien päästöjen arvioinnissa on merkittävästi eroja, sillä tuotannosta syntyvät päästöt voidaan sisällyttää syntyviin kokonaispäästöihin tai vähentää niistä. Soam ja Hillman (2019) arvioivat palmuöljyn rasvahappotisleestä valmistetun HVO-dieselin päästöiksi 15–36 grammaa CO₂-eq/MJ, kun taas Xu'n ym. (2020) mukaan päästöt voivat olla jopa 75–280 grammaa CO₂-eq/MJ, mikäli tuotannon päästöt sisällytetään päästöihin mukaan.

Biopolttoaineiden kasvihuonepäästövähennysten laskennalliset arvot eri tuotantoketjuille on määritelty EU:ssa RED II -direktiivin liitteessä V. Esimerkiksi käytetystä ruokaöljystä valmistetun vetykäsitellyn ruokaöljyn oletetaan vähentävän kasvihuonepäästöjä 83 prosenttia fossiiliseen dieseliin verrattuna (Euroopan parlamentti ja Euroopan unionin neuvosto 2018). Näin ollen HVO-dieselin laskennalliset päästöt voidaan määritellä raaka-aineen avulla.

4.2.4 Käyttö raskaassa liikenteessä ja biopolttoaineiden muut käyttösovellukset

Edistyneiden biopolttoaineiden merkitys kokonaispäästöjen vähentämisessä korostuu pitkissä maantiekuljetuksissa, joissa sähköisten ratkaisujen toteuttaminen voi olla haastavaa. Biopolttoaineet tarjoavat ratkaisun myös muiden liikennemuotojen, kuten lento- ja laivaliikenteen hiilidioksidipäästöjen vähentämiseksi (Siskos ym. 2018). Kansainvälisen lentoliikenteen ja merenkulun sisällyttäminen fossiilisten polttoaineiden vähentämiseen tähtääviin tavoitteeseen kasvattaa lisää vaatimuksia valmistettavien biopolttoaineiden määriksi. Biopohjaisten polttoaineiden muuntaminen uusituvaksi lentopolttoaineeksi (SAF,

sustainable aviation fuel) HVO-dieselin sijaan voisikin tuoda merkittävästi suuremmat vähennykset kokonaispäästöihin. (Transport & Environment 2024).

4.3 Biometaani

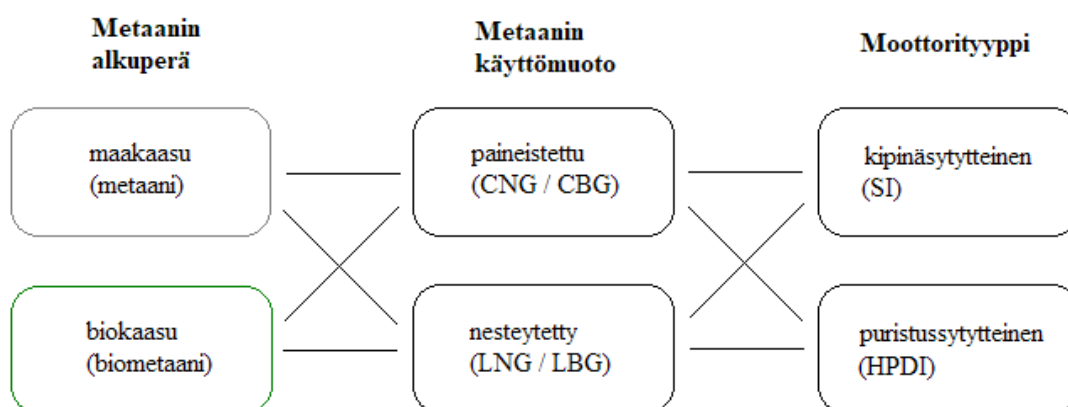
4.3.1 Käyttövoiman perusteet

Maakaasua voimanlähteenään käyttävät ajoneuvot kulkevat maakaasun sisältämällä metaanilla. Metaani on yksinkertainen orgaaninen yhdiste, jonka koostumus on sama niin maakaasussa kuin biopohjaisista raaka-aineista tuotetussa biometaanissa. Siinä missä maakaasu on 98-prosenttisesti metaanista koostuva fossiilinen kaasu, orgaanisista aineista tuotettu biokaasu sisältää merkittävän määrän hiilidioksidia metaanin osuuden ollessa tyypillisesti noin 40–70 prosenttia. Ajoneuvoissa käytettävä biokaasu jatkojalostetaan vähintään 95 prosenttia metaania sisältäväksi biometaaniksi, joka on ajoneuvojen edellyttämä vähimmäispitoisuus ajoneuvokäyttöön soveltuvalla metaanilla (Gustafsson ym. 2020; Työterveyslaitos 2023). Vaikka ajoneuvoissa käytettävä polttoaine on todellisuudessa biometaania tai toisin sanoen jalostettua biokaasua, puhutaan siitä arkikielessä usein pelkkänä biokaasuna (Biovoima 2020). Tässä tutkielmassa valmiista biopohjaisesta polttoaineesta käytetään nimitystä biometaani ja biokaasulla tarkoitetaan jalostamatonta ns. raakabiokaasua.

Maakaasua käyttävien ajoneuvojen potentiaali ilmastonmuutoksen hillitsemiseksi on vähäinen erityisesti siitä syntyvien metaanipäästöjen vuoksi, joita syntyy niin maakaasun tuotannon, nesteyttämisen, kuljettamisen kuin varastoinnin aikana (Cooper ym. 2019; Stettler ym. 2023). Optimistisissakin skenaarioissa maakaasua käyttävillä saavutetaan alle 10 prosentin kokonaiskasvihuonekaasupäästöjen vähennykset dieseliin verrattuna (Mottschall & Rodríguez 2020), ja useissa tutkimuksissa maakaasulla kulkevien hyötyajoneuvojen päästöjen on havaittu olevan dieselajoneuvoja korkeammat erityisesti kokonaispäästöjä tarkastellessa (Sen ym. 2017; Madhusudhanan ym. 2020), jolloin maakaasun käytöstä ei ole hyötyä ilmastonsuojelun kannalta. Koska Suomessa kaasutankkausasemia pääasiassa hallinnoiva valtio-omisteinen Gasum on lisäksi siirtynyt tarjoamaan asemillaan maakaasun sijaista ainoastaan biometaania (Gasum 2024a), tarkastellaan tässä tutkielmassa käyttövoiman tuotantotapana biometaania. Biometaania käyttävien ajoneuvojen avulla pystytään vastaamaan EU:n uusiutuvan energian direktiiviin ja edelleen vuoden

2030 tavoitteiden pohjana toimivaan uusiutuvan energian direktiiviin, sillä biometaanin sisältyminen uusiutuvan energian osuuteen polttoaineiden kokonaiskäytöstä (Prussi ym. 2019).

Metaanilla toimivaa moottoritekniologiaa on ollut liikenteessä hyödynnettävissä pitkään, ja sitä voidaan hyödyntää polttoaineena sekä kipinä- että puristus-sytytteisissä moottoreissa (Lajevardi ym. 2019). Siinä missä kipinäsytytteisiä eli ottomoottoreita voidaan käyttää pelkällä kaasulla, puristus-sytytteiset moottorit käyttävät myös dieseliä kaasun lisäksi, jolloin ne ovat kaksipolttoaineisia moottoreita. Nykyisin markkinoilla olevat puristus-sytytteiset moottorit hyödyntävät HPDI-teknologiaa, jossa käytetään sylinteriin ruiskutetun dieselin palamisesta syntyvää puristuslämpöä kaasun sytyttämiseksi. Tällöin moottori käy ensisijaisesti metaanilla, mutta noin viisi prosenttia moottorin käyttämästä polttoaineesta on dieseliä (Transport & Environment 2021a; Volvo Trucks 2023a).



Kuva 5. Metaanin käyttö raskaassa liikenteessä.

Kaasua käyttävissä ajoneuvoissa voidaan hyödyntää joko paineistettua tai nesteytettyä metaania. Liikennekäyttöön tarkoitettu paineistettu maakaasu (CNG, compressed natural gas) ja biometaanin (CBG, compressed biogas tai CBM, compressed biomethane) on paineistettu yleisimmin 200–250 baariin (Börjesson ym. 2016).

Jäähdyttämällä biometaanin kiehumispisteen ($-161,5\text{ °C}$) alapuolelle polttoaine voidaan tiivistää nesteeksi (Gustafsson ym. 2020). Nesteytetystä maakaasusta käytetään lyhennettä LNG (liquefied natural gas) ja nesteytetystä biometaanista Suomessa yleisesti käytössä olevan LBG:n (liquefied biogas) lisäksi lyhenteitä bio-LNG ja LBM (liquefied biomethane) (Nordsol 2023; Gasum 2024b)

Alamian ym. (2016) mukaan energian hyötysuhde on HPDI-moottoreilla 43 prosenttia, mikä vastaa dieselmoottorin hyötysuhdetta. Kipinäsytytteisellä moottorilla hyötysuhde jäi 35 prosenttiin. Tällöin heikko polttoainetehokkuus kasvattaa ajoneuvojen kulutusta ja samalla energiasisältöön suhteutettuja päästömääriä (Sen ym. 2017).

Nesteytetyn biometaanin energiatiheys on noin 2,5-kertainen verrattuna paineistettuun biometaaniin (Stettler ym. 2023). Nesteytetyn metaanin energiatiheys on tästä huolimatta ainoastaan 21 MJ/l, mikä on huomattavasti vähemmän kuin dieselin 36 MJ/l. Tämän vuoksi nesteytetty maakaasu edellyttää 1,7 kertaa dieseliä suuremman polttoainetankin saman toimintasäteen saavuttamiseksi (Peters ym. 2021). Vaikka nesteytetyn metaanin tilavuusenergiasisältö on dieseliä huomattavasti alhaisempi, on metaanikäyttöisten ajoneuvojen kantama riittävä pitkän matkan kuljetuksiin (Mottschall ym. 2020) ollen noin 1 000–1 600 kilometriä (Iveco 2022a; Volvo Trucks 2023a). Saavutettavan toimintasäteen myötä nestemäisellä metaanilla toimivat ajoneuvot on nähty monesti ainoana kilpailukykyisenä vaihtoehtona dieselajoneuvoille alan kuljetusalan toimijoiden näkökulmasta pitkän matkan kuljetuksissa (Anderhofstadt & Spinler 2019) ja sellaisissa toimintaympäristöissä, joita ei ole teknisesti tai taloudellisesti helppo sähköistää (Noussan ym. 2024). Kaasulla toimivien ajoneuvojen osuuden odotetaan kasvavan erityisesti raskaissa ajoneuvoissa (Prussi ym. 2019).

4.3.2 Käyttövoiman kehityksen nykytila

Metaanilla toimivia voimalinjoja voidaan pitää jo yleisesti käytössä olevana teknologiana, sillä metaanikäyttöisille kuorma-autoille on markkinoilla useampia valmistajia ja teknologian markkinaosuus on pysynyt melko vakaana viime vuosina. Vuoteen 2020 mennessä metaanikäyttöisten kuorma-autojen markkinaosuus yli 3,5 tonnin kokonaispainon myydyistä ajoneuvoista oli EU:n kolme prosenttia (Transport & Environment 2021a), josta määrä on laskenut lähemmäksi kahta prosenttia vuoden 2024 alussa (ACEA 2024a). Kuitenkin nesteytettyä metaania käyttävien ajoneuvojen myynti EU:n alueella on kasvanut vuosittain. Vuonna 2024 rekisteröityjen ajoneuvojen määrä oli elokuun puoleenväliin mennessä 9549 ajoneuvoa, joka on noin 500 ajoneuvoa enemmän kuin edeltävänä vuonna (European Alternative Fuels Observatory 2025). Suomessa rekisteröityjen kaasukäyttöisten kuorma-autojen osuus on ollut viime vuosina 2–3 prosenttia kaikista myydyistä kuorma-autoista (Traficom 2024a).

Raskaissa yli 16 tonnin kuorma-autoissa nestemäistä kaasua käyttävien ajoneuvojen osuus on vuosina 2023–2024 ollut noin kaksi prosenttia kaikista myydyistä ajoneuvoista (ACEA 2024a). Euroopan alueella vuosina myydyistä uusista kaasukäyttöisistä, pitkän matkaan käyttöön tarkoitetuista raskaista kuorma-autoista noin 80 prosenttia on varustettu kipinäsytytteisellä moottorilla, ja jäljelle jäävä osuus muodostuu HPDI-teknologiaa hyödyntävistä moottoreista (Transport & Environment 2021a). Suomessa kaikista vuonna 2023 myydyistä metaanikäyttöisistä raskaista ajoneuvoista 78 prosenttia oli varustettu SI-moottorilla, mutta nestemäistä kaasua käyttävistä eli pitkän matkan kuljetuksiin suunnitelluista ajoneuvoista SI-moottoreiden osuus jäi 43 prosenttiin (Traficom 2024a).

Suurista kuorma-autonvalmistajista Iveco, Scania ja Volvo ovat olleet merkittävimmät investoijat metaanikäyttöiseen teknologiaan (Transport & Environment 2021a). Volvo hyödyntää pitkän matkan kuljetuksiin suunnitelluissa metaanikäyttöisissä Volvo FH LNG -ajoneuvoissaan dieselsytytteistä HPDI-järjestelmää, jonka lisäksi Volvo valmistaa metaanilla toimivia SI-moottoreita pienempiin ajoneuvoihin, kuten jätekeräysautoihin (Volvo Trucks 2023a). Scanian valmistamissa metaanikäyttöisissä kuorma-autoissa käytetään kipinäsytytteisiä moottoreita, mutta yritys tarjoaa markkinoille sekä CNG- että LNG-moottoreita (Scania 2020). Myös Iveco hyödyntää raskaissa metaanikäyttöisissä kuorma-autoissa kipinäsytytteisiä moottoreita (Iveco 2022a). Merkittävimmistä raskaiden kuorma-autojen valmistajista Mercedes Benz, DAF ja MAN eivät valmista metaanikäyttöisiä raskaita kuorma-autoja, sillä ne ovat keskittyneet kehitystyössään muiden voimalinjojen kehittämiseen (Transport & Environment 2021a).

4.3.3 Jakeluinfrastruktuuri

Metaania voidaan toimittaa jakeluasemille kahdella eri tavalla: nestemäinen biometaani toimitetaan jakeluasemille säiliöajoneuvoissa, kun taas paineistettua maakaasua voidaan toimittaa asemille myös putkia pitkin, mikäli siihen soveltuvaa infrastruktuuria on olemassa (Takman & Andersson-Sköld 2021).

Infrastruktuurin luominen metaanikäyttöiselle liikenteelle edellyttää ajoneuvojen saatavuuden lisäksi kansallisesti ja alueellisesti johdonmukaisesti koko toimitusketjulle kordinoituja toimia biometaanin tuottajien, kaasun jakelijoiden ja kuljetusyritysten välillä. Lisäksi erilaiset hallinnolliset tukitoimet tuotannolle, jakelulle ja ajoneuvoille ovat merkittävässä roolissa investointien toteutumiselle. Viime kädessä teknologian toteutuminen perustuu kuljetusyritysten halukkuuteen investoida nesteytettyä biometaania käyttäviin

ajoneuvoihin sekä kuljetusten ostajien halukkuuteen vaatia ja maksaa uusiutuvia polttoaineita käytävistä kuljetuksista. (Magnusson ym. 2020; Noussan ym. 2024).

Merkittävin metaanitankkausasemaverkoston ylläpitävä toimija pohjoismaissa on Suomen valtion omistama Gasum, joka on kaksinkertaistanut asemiensä määrän 2020-luvulla yli 100 asemaan siirtyen samalla tarjoamaan asemillaan ainoastaan biometaania (Magnusson ym. 2020; Gasum 2024a). Suomessa eri toimijoiden asemia on tällä hetkellä lähes 100, ja ne sijaitsevat pääasiassa suurimpien asutuskeskusten lähetyvillä. Vaikka suuri osa biometaania tarjoavista asemista tarjoaa ainoastaan paineistettua kaasua, on raskaalle kalustolle kohdennettujen, nesteytettyjen asemien määrä kasvanut merkittävästi viime vuosina. Nesteytettyä biometaania tarjoavia asemia on pyritty rakentamaan vastaamaan yhä paremmin kuljetusyritysten tarpeisiin, jonka myötä uusia asemia on rakennettu lähelle kuljetusyritysten toimipisteitä. (Gasum 2024b).

4.3.4 Biometaanin tuotanto

Ainoastaan uusiutuvista lähteistä saadut polttoaineet voivat johtaa merkittäviin ilmastonmuutoksen vaikutusten vähennyksiin (Gustafsson ym. 2020). Siinä missä maakaasun käyttö Euroopassa perustuu pääosin tuontikaasuun, biometaanin tuotanto perustuu pääasiassa paikalliseen tuotantoon (Gustafsson & Svensson 2021).

Ajoneuvoissa käytettävää biometaania voidaan valmistaa usealla erilaisella prosessilla, joista merkittävimmät kirjallisuudessa toistuvat vaihtoehdot ovat

- mädätys (anaerobic digestion, AD)
- biomassan kaasutus (thermal gasification, TD)
- power-to-gas.

Ensimmäisessä valmistustavassa biometaania tuotetaan mädättämällä orgaanista jätettä, kuten kotitalouksien biojätettä tai maataloudesta syntyvää lantaa ja biomassaa mikrobien avulla. Mikrobit hajottavat biomassaa anaerobisessa ympäristössä, jolloin syntyy merkittävästi metaania ja hiilidioksidia sisältävää biokaasua, josta saadaan pääasiassa metaania sisältävää biometaania poistamalla hiilidioksidi. Mädätysprosessista jäljelle jäänyt orgaaninen jäännös voidaan hyödyntää edelleen lannoitteena (Kolb ym. 2021; Takman & Andersson-Sköld 2021; Gasum 2024b).

Biometaania voidaan tuottaa myös termisen kaasutusprosessin avulla, jossa lignoselluloosapohjaista raaka-ainetta kuten puuta tai olkea kaasutetaan esimerkiksi hapen avulla korkeassa, yleensä yli 700–800 celsiusasteen lämpötilassa, jolloin syntyy mm. typpeä, vetyä, hiilidioksidia ja metaania sisältävää tuotekaasua. Tuotekaasusta voidaan edelleen jalostaa metanoimalla ajoneuvoihin sopivaa biometaania (Kolb ym. 2021). Biometaanin tuotanto mahdollistaa erilaisten yhdyskuntajätteen hyödyntämisen liikenteessä, ja tästä näkökulmasta biometaanin arvoketju on keskeisessä roolissa sekä resurssien kierrätyksen toteuttamisessa että vaihtoehdoisen polttoaineen tuotannossa (Noussan ym. 2024).

Biometaanin valmistukseen on lisäksi kehitteillä ns. power-to-gas eli P2G-ratkaisuja, joissa sähkön ja veden avulla tuotetusta vedystä muunnetaan hiilidioksidin avulla kemiallisella reaktiolla edelleen metaania (Kolb ym. 2021; Gasum 2023). Biometaani lukeutuu yhdeksi useista synteettisten polttoaineiden vaihtoehdoista, joita sähköenergiasta voidaan vedyn avulla tuottaa. (Nemmour ym. 2023). Uusiutuvalla sähköllä tuotetusta vedystä ja suoraan ilmakehästä talteen otetusta hiilidioksidista tuotetulla biometaanilla eli ns. e-metaanilla voitaisiin tarjota lähes päästötön vaihtoehto kaasukäyttöisille ajoneuvoille, sillä merkittävin osuus päästöistä syntyy vedyn tuotannosta (Bidart ym. 2022). Näin syntyneen ns. synteettisen metaanin haasteena on kuitenkin tuotannon alhainen energiatehokkuus ja polttomoottorin alhainen hyötysuhde. Lisäksi tuotanto edellyttäisi uusiutuvan sähkön tuotannon määrän lisäämistä. Haasteista huolimatta menetelmää voidaan pitää lupaavimpana keinona seuraavan sukupolven biometaanin tuotantoon (Transport & Environment 2021a).

Siinä missä mädättämällä tuotetun biometaanin teknologia on laajalti käytössä, kaksi jälkimmäistä tuotantotapaa eivät ole toistaiseksi kaupallisesti kannattavia, vaikka erityisesti termisen kaasutuksen osalta viime vuosina onkin käynnistetty merkittävä määrä erilaisia pilotointihankkeita erityisesti Euroopassa (Prussi ym. 2019; Bidart ym. 2022). Kumpikin näistä menetelmistä vaatii merkittävästi sähköenergiaa, jolloin vihreä sähkö on edellytyksenä vähäpäästöisen biometaanin tuottamiseksi (Alamia ym. 2016).

4.3.5 Ympäristövaikutukset

4.3.5.1 Päästöt biometaanin tuotannosta

Biometaanin tuotannaikaisiin päästöihin vaikuttaa merkittävästi se, missä määrin metaanin tuotannon päästöt lasketaan kokonaispäästöihin. Bidartin ym. (2022) mukaan päästöt voidaan huomioida kahdella eri tavalla:

- Biometaanin päästöjä arvioitaessa voidaan huomioida ainoastaan ne päästöt, jotka syntyvät biokaasun jalostamisesta biometaaniksi. Biokaasun tuotantoon liittyvät vaiheet kuten biomassan käsittely ja anaerobinen mädätys voidaan sen sijaan katsoa kasvihuonekaasupäästöttömiksi, koska ne ovat esimerkiksi osa jätteiden käsittelyprosessia.
- Biokaasun tuotantovaiheen voidaan katsoa olevan myös olennainen osa biometaanin tuotantoketjua, jolloin se sisällytetään kasvihuonekaasupäästöjen laskentaan. Tällöin biokaasun tuotantovaiheen päästöt sisältävät raaka-aineen käsittelyn, biokaasun tuotannon ja mädätteen käsittelyn vaiheet sekä biometaanin tuotantovaiheen.

Päästöt lasketaan kansainvälisten laskentasääntöjen mukaisesti ensimmäisellä tavalla (Stettler ym. 2023). Näin toimitaan myös EU:n alueella: viralliset viitearvot eri raaka-aineiden tuotannosta syntyville päästöille annetaan EU:n uusiutuvan energian direktiivissä, jossa määritetyt luvut perustuvat päästöistä syntyviin keskiarvoihin (Noussan ym. 2024).

Ruoaksi kelpaavien eli ns. ensimmäisen sukupolven kasvien käyttäminen biometaanin valmistamiseen synnyttää itsessään päästöjä epäsuoran maankäytön muutoksen, lannoitteiden käytön sekä veden ja energian kulutuksen myötä. Koska tuotanto perustuu polttoaineen valmistukseen, lasketaan osuus osaksi kokonaispäästöjä (Transport & Environment 2021a). Ensimmäisen sukupolven biopolttoaineiden ilmastohyödyt ovatkin alhaiset, ja kasvien kasvattamiseen käytettävä pinta-ala on pois ruoantuotantoon hyödynnettävästä maa-alueesta (Alamia ym. 2016). Syötäväksi kelpaavien raaka-aineiden käyttö biometaanin valmistuksessa voi johtaa jopa maakaasua korkeampiin päästöihin. (Kolb ym. 2021).

Ruoantuotannon ja erilaisten yhteiskunnan toimintojen sivuvirtoina syntyvien raaka-aineiden käytöstä aiheutuvat päästöt määritetään puolestaan yleensä ainoastaan

biometaanin muuntamisesta syntyvien päästöjen osalta, koska ainoastaan sillä on vaikutusta kokonaispäästöihin (Bidart ym. 2022). Tällöinkin biometaanin valmistamisesta syntyviin kokonaispäästöihin vaikuttaa merkittävästi sekä tuotantotapa että erityisesti mädätyksessä käytetty raaka-aine. Tiettyjen raaka-aineiden, kuten lannan, lietteen tai ruuan-tuotannon jätteiden hyödyntäminen raaka-aineena voi mädätyksen yhteydessä johtaa laskennallisten hyvitysten myötä jopa negatiivisiin elinkaaripäästöihin, mikäli niiden hävittäminen olisi muutoin aiheuttanut kasvihuonekaasupäästöjä. (Börjesson ym. 2016; Nourssan ym. 2024). Muita tärkeitä huomioon otettavia näkökohtia päästöjen arvioinnissa ovat käytetyn energian tuotantotapa, lannoitteiden käyttö ja eri tuotantovaiheissa syntyvät metaanipäästöt (Nourssan ym. 2024), joiden syntymiseen vaikuttaa myös biokaasun puhdistukseen ja biometaanin nesteytykseen käytetty teknologia (Gustafsson ym. 2020). Erityisesti metaanipäästöjen minimointi on biometaanin tuotannossa äärimmäisen tärkeää ilmastomuutosvaikutusten vähentämiseksi. (Gustafsson & Svensson 2021). Lisäksi mahdollisuus varastoida tai käyttää uudelleen jalostusvaiheessa syntyvää tiivistettyä hiilidioksidia voi edelleen vähentää syntyvien päästöjen kokonaismäärää. (Nourssan ym. 2024).

Kaasuttamalla ja erityisesti power-to-gas-menetelmällä valmistetun biometaanin päästöihin vaikuttaa ensisijaisesti valmistukseen tarvittavan energian tuotantotapa. Uusiutuvalla sähköllä tuotetun biometaanin valmistuksesta syntyvät päästöt ovat moninkertaisesti pienemmät kuin päästöt maakaasun tuotannossa (Kolb ym. 2021). Börjesson ym. (2016) arvioivat kaasuttamalla tuotetun biometaanin päästöjen olevan noin 75–90 prosenttia alhaisemmat kuin dieselajoneuvoilla.

4.3.5.2 Päästöt käytöstä

Molekyylirakenteensa ansiosta metaani tuottaa energiasisältöä kohden noin neljänneksen vähemmän hiilidioksidipäästöjä kuin diesel. Se on kuitenkin paineistettava tai nesteytettävä, jotta sen tilavuusenergisäily olisi riittävä polttoaineena käytettäväksi, jonka myötä polttoaineen tuottamiseen tarvittavat päästöt nousevat (Mottschall ym. 2020).

Paineistettua biometaania hyödyntävien ajoneuvojen käytöstä syntyvät päästöt ovat mm. Cooperin ym. (2019) mukaan merkittävästi suuremmat kuin dieselajoneuvojen päästöt. Sen sijaan nesteytettyä metaania käyttävien ajoneuvojen käytöstä syntyvät kasvihuonepäästöt ovat arviolta noin 15–20 prosenttia pienemmät kuin dieseliä käyttävillä ajoneuvoilla (Osorio-Tejada ym. 2017; Cooper ym. 2019; Calise ym. 2024). Nesteytettyä metaania hyödyntävien ajoneuvojen on toisaalta arvioitu aiheuttavan myös enemmän

käytöstä syntyviä päästöjä kuin dieselajoneuvojen, mikäli pakokaasupäästöjen lisäksi huomioidaan tankista haihtuva metaani sekä tankkausten ja huoltojen yhteydessä syntyvät metaanipäästöt. Esimerkiksi kaasusäiliöissä tai säiliöihin suoraan kytketyissä komponenteissa tehtävät huoltotyöt edellyttävät, että kaikki varastoitu kaasu poistetaan järjestelmästä ennen työn aloittamista (Stettler ym. 2023). Näiden osuus on arviolta joitakin prosentteja kokonaispäästöistä (Mottschall ym. 2020).

Puristussytytteisillä HPDI-moottoreilla on mitattu paremman hyötysuhteen myötä SI-moottoreita pienemmät pakokaasupäästöt, sillä SI-moottoreiden energiatehokkuus on selkeästi sekä HPDI- että dieselmoottoreita heikompi. (Alamia ym. 2016; Gustafsson & Svensson 2021). Rial ja Pérez (2021) arvioivat HPDI-ajoneuvojen päästöjen olevan käytössä kolme prosenttia SI-moottoreita alhaisemmat. Toisaalta HPDI-moottoreissa käytettävän, metaanipäästöjä aiheuttavan dynaamisen tuuletusjärjestelmän myötä HPDI-moottoreiden kokonaispäästöt voivat kuitenkin nousta korkeammiksi (Stettler ym. 2023), joskin Yuan ym. (2019) arvioivat pakoputken ohi kulkevien metaanipäästöjen osuuden elinkaaripäästöistä jäävän ainoastaan kahteen prosenttiin.

Metaani hajoo ilmakehässä hiilidioksidia nopeammin, ja näin ollen tarkasteltava aikajänne vaikuttaa sen ilmastoalämmittävien päästöjen arviointiin. Vaikka nestemäisellä biometaanilla kulkevan kuorma-auton päästöt käytössä olisivatkin yli 10 prosenttia dieselajoneuvoa pienemmät 100 vuoden lämmityspotentialilla (GWP-100) arvioiden, voivat ne olla 20 vuoden lämmityspotentialilla (GWP-20) tarkasteltuna olla yli 10 prosenttia korkeammat (Mottschall ym. 2020; Transport & Environment 2021a). Kasvihuonepäästöjen ohella biometaania käyttävien kuorma-autojen on todettu päästävän enemmän pienhiukkasia kuin dieselkuorma-auto sekä kaupunkiajossa että maantieliikenteessä. Kuitenkin biometaania käyttävien ajoneuvojen NO_x-päästöt olivat 50–75 prosenttia alhaisemmat kuin dieselajoneuvoilla (Transport & Environment 2021a).

Biometaanin dieseliä merkittävästi pienemmät laskennalliset päästöt perustuvat hiilidioksidipäästöjen neutraaliuteen, eli biometaanin käytöstä syntyvien päästöjen lasketaan sisältyvän suljettuun hiilikiertoon (Bidart ym. 2022). Tästä syystä tuotantotavalla on suuri merkitys ajoneuvojen päästöihin, ja biometaania käyttävien ajoneuvojen laskennalliset hiilidioksidipäästöt voivat olla jopa negatiivisia toisen sukupolven raaka-aineita ja uusiutuvia energialähteitä käytettäessä. (Gustafsson & Svensson 2021). Bidart ym. (2022) arvioivat, että biometaanilla kulkevien raskaiden ajoneuvojen kokonaispäästöt ovat 55–84

prosenttia pienemmät kuin maakaasulla kulkevien ajoneuvojen. Börjessonin ym. (2016) mukaan biomassasta tuotetut kaasupolttoaineet vähentävät dieseliin verrattuna kasvihuonepäästöjä 50–80 prosenttia, Alamian ym. (2016) mukaan päästöt vähenevät 43–67 prosenttia moottoriteknologiasta riippuen, ja Stettler ym. (2023) arvioivat, että nesteytettyä biometaanin käyttävien raskaiden ajoneuvojen kokonaispäästöt ovat metaanivuodon määrästä riippuen 34–66 pienemmät kuin dieselajoneuvoilla. Tuotantotavalla on kuitenkin huomattava vaikutus päästöihin, sillä luonnontilaisen maan muuttaminen biopolttoaineiden tuotantoon ja syömäkelpoisten raaka-aineiden käyttö voi johtaa päästöjen merkittävään kasvuun dieseliin verrattuna (Kolb ym. 2021; Takman ja Andersson-Sköld 2021).

4.3.6 Käyttö raskaassa liikenteessä ja biometaanin muut käyttösovellukset

Sopivien jäte- ja jäännösainepohjaisten raaka-aineiden saatavuus biometaanin tuotantoon on nähty rajalliseksi ja riittämättömäksi korvaamaan merkittävää osaa kuorma-autojen energiantarpeesta Euroopassa (Transport & Environment 2021a). Euroopan biokaasusektori arvioi kykenevänsä kaksinkertaistamaan biometaanin tuotannon 35 miljardiin kuutiioon vuoteen 2030 mennessä EU:n alueella ja kasvattamaan tuotannon edelleen 125 miljardiin kuutiioon vuonna 2050 (EBA 2022).

Mikäli kaikki tuotettu biometaani kohdennettaisiin tiekuljetussektorille, ei energiaa jäisi lainkaan muiden sektoreiden käyttöön. Näin ollen eri sektoreiden välillä onkin kysyntää rajallisista saatavilla olevista raaka-aineista (Transport & Environment 2021a). Mikäli 35 miljardin kuution tuotantotavoite biometaanille vuodelle 2030 saavutetaan, tästä reilu neljännes eli 9 miljardia kuutiota olisi käytettävissä maantieliikenteessä, mikä mahdollistaisi biometaanilla kulkeville ajoneuvoille noin 10 prosentin osuuden raskaan liikenteen osalta EU:ssa (Prussi ym. 2019). Transport & Environmentin (2021a) arvion mukaan biometaanilla voitaisiin kattaa 4–28 prosenttia raskaan liikenteen kokonaismäärästä Euroopan suurimmissa maissa vuoteen 2050 mennessä.

Nykyisellään suurin osa tuotetusta biokaasusta käytetään sähkön ja lämmön tuotantoon, mutta yhä suurempi osa käsitellään vastaamaan liikenteen tarpeisiin (Gustafsson ym. 2020). Biokaasun vahvuus energiantuotannossa on saadun energian tasaisuus, sillä monissa uusituovissa energialähteissä, kuten tuuli- ja aurinkovoimassa, ongelmana on tuotetun energian määrän suuri vaihtelevuus (Noussan ym. 2024).

Liikenteessä biometaania voidaan käyttää maantieliikenteen lisäksi laivaliikenteessä, jossa päästöjä on muutoin vaikea vähentää (Noussan ym. 2024). Jäteaineksista valmistettua nesteytettyä biometaania käyttävien merialusten laskennalliset päästöt ovat negatiivisia maantieliikenteen tavoin (Hagos & Ahlgren 2018).

4.4 Sähkö

4.4.1 Käyttövoiman perusteet

Akkukäyttöisen sähkömoottoriajoneuvon (BEV) voimalinja koostuu akusta, jännitemuuntimesta ja sähkömoottorista. Sähkömoottorin tehtävä on magneettikentän avulla muuntaa akusta saatava sähköenergia mekaaniseksi energiaksi, ja mekaaninen energia toimitetaan edelleen mahdollisen vaihteiston kautta kuorma-auton vetäville pyörille ajoneuvon liikuttamiseksi. Usein kaksi vaihdetta sisältävän vaihteiston tehtävänä on mahdollistaa moottorin riittävä vääntömomentti. Sähkömoottori mahdollistaa myös mekaanisen energian talteenoton, jolloin jarrutuksista saatava energia voidaan hyödyntää käytettäväksi voimansiirrossa (Basma ym. 2021a; Cunanan ym. 2021; Tol ym. 2022). Sähköllä toimivan voimanlähteen toimintaperiaatetta voidaan pitää yksinkertaisempänä kuin polttomoottorilla toimivia voimanlähteitä, sillä sähköisessä voimansiirrossa ei ole käytössä vastaavalla tavalla liikkuvia mekaanisia osia (Lajevardi ym. 2019).

Sähköisten kuorma-autojen energiatehokkuus vaihtelee toimintaympäristön mukaan 1,23–1,94 kWh/km välillä (Mareev ym. 2018). Energiatehokkuuden hyötysuhde on näin ollen keskimäärin noin 2,5-kertainen suhteessa dieselajoneuvoihin (Nykvist & Olsson 2021). Hyötysuhde on keskimääräistä korkeampi kaupunkiympäristössä ja tasaisilla maantiesuoksilla, ja mäkisissä olosuhteissa hyötysuhde puolestaan laskee (Liimatainen ym. 2019). Sähköisen ajoneuvon hyötysuhde on myös merkittävästi parempi kuin polttoainoajoneuvolla, sillä akun käyttö edellyttää käytettävälle energialle vähemmän muunnosvaiheita (Aguilar & Groß 2022).

4.4.2 Käyttövoiman kehityksen nykytila

Raskaiden BEV-ajoneuvojen määrä on kasvanut nopeasti EU:n alueella viimeisten vuosien aikana. Ajoneuvojen kantama on samalla kasvanut huomattavasti. Ajoneuvojen määrä on kasvanut vuoden 2020 973 ajoneuvosta vuoden 2023 7977 ajoneuvoon, ja vuonna 2023 myytyjen ajoneuvojen määrä kasvoi 3,5-kertaiseksi vuoteen 2022

verrattuna. Vuoden 2024 lopussa EU:n alueella arvioitiin kulkevan lähes 12 000 sähköistä raskasta ajoneuvoa (ACEA 2024a; European Alternative Fuels Observatory 2025). Myös Suomessa ladattavien sähköisten ajoneuvojen osuus raskaista ajoneuvoista on kasvanut nopeasti, sillä 91:stä Suomessa rekisteröidystä ajoneuvosta 69 rekisteröitiin vuosien 2023 ja 2024 aikana (Traficom 2024a). Nopeasta kasvusta huolimatta sähköisten ajoneuvojen osuus myydyistä ajoneuvoista jäi niin Suomessa kuin Euroopassakin vajaaseen prosenttiin.

Kaikki merkittävimmät Euroopan markkinoilla toimivat kuorma-autojen valmistajat ovat esitelleet omat sähköiset ajoneuvonsa maantiekuljetuksiin. Mercedes Benz esitteli vuonna 2023 maantiekuljetuksiin suunnitellun eActros 600 -mallinsa, jonka tuotannon on tarkoitus alkaa vuoden 2024 aikana. 621 kWh:n LFP-akuilla varustetulle 40 tonnin ajoneuvolle luvataan 520 kilometrin toimintasäde (Mercedes Benz Trucks 2024). Iveco lupasi vuoden 2023 lopulla markkinoille tuomalleen 738 kWh:n akulla varustetulle Iveco HD BEV-mallin ajoneuvolle 500 kilometrin toimintasäteen (Iveco 2023). Volvon vuoden 2024 jälkimmäisellä puoliskolla markkinoille tuoman FH Electric -kuorma-auton uusimman version luvataan kulkevan 600 kilometriä ilman latausta (Volvo Trucks 2024a). Samaan konserniin kuuluvan Renault Trucksin E-Tech T -mallisto tarjoaa 300 kilometrin toimintasäteen 540 kWh:n akustolla (Renault Trucks 2024). Scania tuo sähkökuorma-autoihinsa vuoden 2025 aikana valittavaksi 728 kWh:n akuston, joka mahdollistaa 42 tonnin ajoneuvolle 550 kilometrin toimintasäteen (Scania 2024a). Vuonna 2024 MAN lisäsi valikoimiinsa oman 480 kWh:n akulla varustetun eTGX-mallinsa (MAN 2023) ja DAF esitteli XF Electric -ajoneuvonsa, jolle se tavoittelee 500 kilometrin toimintasädettä (DAF 2024a). Liikenteen sähköistyminen on tuonut markkinoille myös uusia toimijoita, sillä mm. Tesla on laajentamassa valikoimaansa raskaisiin ajoneuvoihin Semi-kuorma-autolla, jolle on luvattu 800 kilometrin kantama (Tesla 2024). Raskaiden BEV-ajoneuvojen kehitys erityisesti toimintasäteen osalta on ollut nopeaa: vuosikymmenen alussa raskaille ajoneuvoille luvattiin pääasiassa noin 200 kilometrin toimintasäde (Transport & Environment 2021b), kun taas viimeisimmät esitellyt ajoneuvot yltyvät lähes poikkeuksetta vähintään 500 kilometrin toimintasäteeseen.

4.4.3 Käyttövoiman ominaisuudet

4.4.3.1 Akkujen toiminta ja energiatiheys

Sähköisten ajoneuvojen suurin haaste on energian määrän suhde akun painoon (Lajevardi ym. 2019). Akun energiatheydellä ja -tehokkuudella on suuri merkitys erityisesti raskaiden akkukäyttöisten ajoneuvojen suorituskykyyn, sillä BEV-ajoneuvoilla akun vaikutus ajoneuvon kokonaispainoon on huomattavasti suurempi kuin polttoaineen vaikutus dieselajoneuvojen painoon. BEV-ajoneuvot myös kantavat aina saman akkupainon, kun taas polttomoottoriajoneuvot kevenevät polttoaineen määrän vähentyessä (Teichert ym. 2023). Suuremman massan ohella akun edellyttämä tila on noin kaksinkertainen dieselajoneuvon moottorin ja polttoainetankin tilan tarpeeseen verrattuna (Mareev ym. 2018).

Sähköisen ajoneuvon voimansiirron komponenttien kokonaispaino ilman akkuja on noin 750 kg sisältäen mm. vaihteiston ja tarvittavan elektroniikan. Akun paino puolestaan 825 kWh:n kapasiteetilla ja 150 Wh/kg:n energiatheydellä on 5500 kg, jolloin ajoneuvon omamassaksi muodostuisi kokonaisuudessaan noin 18 tonnia. Tämä on huomattava lisäys verrattuna polttomoottoriajoneuvoihin, joiden omamassa on noin 15 tonnia. (Mareev ym. 2018). Koska raskaiden ajoneuvojen kokonaismassa on rajoitettu n. 40 tonniin, raskaiden ajoneuvojen akkujen arvellaan vähentävän kuljetuskapasiteettia lähes kolme tonnia dieselajoneuvoon verrattuna (Teichert ym. 2023). Mareev ym. (2018) arvioivatkin, että 40 tonnin painorajoituksella ajoneuvon bruttokapasiteetti voi jäädä 80 prosenttiin dieselajoneuvon maksimikuormasta. Tolin ym. (2022) mukaan sähköisillä ajoneuvoilla voidaan päästä samaan bruttokapasiteettiin vuoteen 2030 mennessä BEV-ajoneuvojen kehittyvän energiatehokkuuden myötä. Transport & Environment (2021b) arvioi vuonna 2030 uusien kuorma-autojen energiankulutuksen olevan 1,21 kWh/km, joka olisi 0,31 kWh/km vähemmän kuin vuonna 2020.

Akun ominaisuuksilla on merkittävä vaikutus BEV-ajoneuvojen suorituskykyyn. Merkittävimpiä käytettävyyteen vaikuttavia ominaisuuksia ovat akkujen energiatiheys (Wh/kg), ominaisteho (W/kg), käyttöikä sekä lämpötilan hallintavaatimukset (Mulholland ym. 2018).

Litiumioniakut ovat vakiinnuttaneet asemansa sähköajoneuvojen akkujärjestelmänä. Niillä on korkeampi energiatiheys ja tehokkuus, parempi kapasiteetin säilyvyys ja pidempi elinkaari verrattuna muihin ladattaviin järjestelmiin (Ding ym. 2019). Raskaissa

ajoneuvoissa akun energiatiheys on yksi tärkeimmistä akun valintaan vaikuttavista tekijöistä, sillä se vaikuttaa suoraan ajoneuvon hyötykuormaan eli kuljetuskapasiteettiin (Basma ym. 2021a).

Litiumioniakuissa voidaan käyttää erilaisia akkukemioita. Raskaissa ajoneuvoissa käytetyt akkutyyppit ovat litiumnikkelimangaanikobolttioksidi- (NMC), litiumnikkelikobalttialumiinioksidi- (NCA) ja litiumrautafosfaattiakut (LFP) (Euroopan komissio 2020; Basma ym. 2021a). Akkutyyppit eroavat toisistaan niin latausnopeuden, energiatehokkuuden, käyttöiän, energiankulutuksen, kapasiteetin kuin hinnankin osalta. Samalla niiden vahvuudet vaihtelevat eri latausnopeuksien ja -syklien välillä (Schneider ym. 2023).

NMC-akun vahvuus on pitkä käyttöikä ja korkea energiatiheys, jonka odotetaan lähivuosina kasvavan nykyisestä 250 Wh/kg:n tasosta 300 Wh/kg:n tasolle (Basma ym. 2021a). NCA-akun energiatiheys vastaa NMC-akkua (Ding ym. 2019) Teknologian tarjoama kantama on 2–3 prosenttia NMC-akkua suurempi, mutta sen käyttöikä jää merkittävästi muita vaihtoehtoja heikommaksi. NCA-akun kustannukset ovat samaa tasoa NMC-akun kanssa (Basma ym. 2021a). Kolmas vaihtoehto raskaille sähköisille ajoneuvoille on LFP-akku. LFP-kemiaa sisältävä akku tarjoaa alhaisemman energiatihedden (200–220 Wh/kg) kuin NMC- ja NCA-akku, mutta sen käyttöikä on huomattavasti edellisiä vaihtoehtoja pidempi eikä akun valmistuksessa tarvita lainkaan kobolttia. Edullisimpien raaka-aineiden myötä myös akun kustannukset ovat hieman muita vaihtoehtoja alhaisemmat. (Burke & Sinha 2020). Alhaisemmasta energiatihedestä huolimatta Basma ym. (2021a) arvioivat LFP-akulla saavutettavan toimintasäteen yltävän 95–98 prosenttiin NMC-akun toimintasäteestä.

Uusien akkuteknologioiden kehittäminen nähdään tärkeänä, sillä nykyisillä akkukemioilla energiatihedden teoreettinenkin maksimi jää noin 350–400 Wh/kg:n tasolle (Ding ym. 2019). Kehittämällä akkujen tehoa, energiatihedettä, hallintaa ja latausnopeutta saataisiin akkukäyttöisten raskaiden ajoneuvojen toimintaedellytyksiä ja kilpailukykyä parannettua entisestään (Cunanan ym. 2021). Esimerkiksi akun tehokkuutta kehittämällä saadaan akun suhteellista painoa vähennettyä. Tällöin samankokoisella akulla voidaan kulkea aikaisempaa pidempi matka tai vaihtoehtoisesti pienemmällä akulla voidaan kulkea sama matka kuin aiemmin, jolloin kustannukset laskevat ja hyötykapasiteetti kasvaa (Basma ym. 2021a).

4.4.3.2 Toimintasäde

Akkujen paino synnyttää haasteita ajoneuvojen toimintasäteelle, joka jää merkittävästi muita käyttövoimia, kuten dieseliä tai vetypolttokeinoja hyödyntäviä ajoneuvoja alhaisemmiksi (Cunanan ym. 2021). Kantama jää suuremmillakin akuilla rajalliseksi, sillä esimerkiksi 1 000 kWh:n kapasiteetilla varustetulla akulla saavutetaan noin 500 kilometrin toimintasäde 40 tonnin kuljetuksissa (Basma ym. 2021a). Alonso-Villar ym. (2023) huomauttavatkin, että akkukäyttöisten raskaiden ajoneuvojen hyödyntäminen on toimintasäteen luoman rajoitteen myötä riippuvainen kuljetusyrittäjän toimintamallista ja ajoneuvon kapasiteetista. Toimintasädettä tarkasteltaessa on myös tärkeää huomioida ajoneuvon akun kapasiteetin lasku elinkaaren aikana. Akun eliniän loppu määritellään usein 20 prosentin kapasiteetin menetyksellä. (Mareev ym. 2018).

Ajoneuvon toimintasäteen kasvattaminen akkukapasiteettia nostamalla lisää akun painon osuutta kokonaismassasta, mikä puolestaan pienentää ajoneuvon maksimikuormakapasiteettia (Al-Hanahi ym. 2021). Koska akkukapasiteetin kasvattaminen nostaa lisääntyneen massan myötä myös käytettävän tehon tarvetta, jää toimintasäteen kasvu noin 90–95 prosenttiin akkukapasiteetin kasvusta (Basma ym. 2021a). Toimintasädettä arvioitaessa on tärkeää huomioida todellinen käytössä syntyvä kulutus, sillä erilaiset apulaitteet voivat kuluttaa huomattavasti käytössä olevaa sähkövarausta (Alonso-Villar ym. 2023), Erityisesti lämmönhallinta voi vaikuttaa huomattavasti ajoneuvojen toimintasäteeseen. Koska sähkömoottorista käytöstä ei synny hukkalämpöä polttomoottorin tapaan, käyttää ajoneuvon lämpöhallintajärjestelmä energiaa akun käyttölämpötilan säätelyssä sekä ohjaamon viilentämisessä ja lämmittämisessä (Tol ym. 2022). Jakelukuljetuksissa taas 4–7 prosenttia raskaiden ajoneuvojen akun varauksen käytöstä voi muodostua perälaudan käytöstä (Alonso-Villar ym. 2023).

Raskaiden ajoneuvojen tulee kyetä toimimaan kevyempiä ajoneuvoja pidemmällä toimintasäteillä, vaikka niiden energiankulutus on suurempi (Forrest ym. 2020). Raskaiden kuljetusten edellyttämästä toimintasädestä on esitetty erilaisia arvioita, jotka eroavat toimintasäteen ja lataustaukojen osalta. Liimataisen ym. (2019) mukaan 300 kilometrin matkaa yhdellä latauksella voidaan pitää vähimmäisvaatimuksena raskaille ajoneuvoille, sillä ajoneuvot voivat kulkea maantiellä noin 350 kilometriä ennen EU:n alueella määrättyä 45 minuutin lepoaikaa 4,5 ajotunnin jälkeen.

On odotettavissa, että lähivuosina 40 tonnin kuljetuksissa saavutetaan 500 kilometrin toimintasäde 700 kWh:n akkukapasiteetilla ja 700 kilometrin toimintasäde 1000 kWh:n akkukapasiteetilla. 500 kilometrin toimintasäteellä saadaan katettua 70 prosenttia toimijoiden päivittäisestä tarpeesta ilman latausta, kun taas yhdellä 45 minuutin lataustauolla 350 kW:n pikalatauksella saadaan katettua 95 prosenttia toimijoista (Basma ym. 2021b). Teichertin ym. (2023) mukaan 800 kilometrin päivittäisellä toimintasäteellä saataisiin katettua 98 prosenttia kaikista pitkän matkan kuljetuksista Euroopassa Transport & Environmentin (2022) arvion ollessa 97 prosenttia. Schneider ym. (2023) arvioivat, että yhdeksän tunnin päivittäiseen ajoaikaan tarvittaisiin ilman latausmahdollisuutta 1 436 kWh:n akkukapasiteetti.

4.4.3.3 Latausnopeus

Raskailla ajoneuvoilla latausnopeuden ja akun kapasiteetin tulee suurempien päivittäisten ajomatkojen myötä olla suurempi kuin kevyillä ajoneuvoilla (Forrest ym. 2020). Latausnopeudella on huomattava vaikutus raskaiden ajoneuvojen päivittäiseen toimintasäteeeseen ja näin ollen käytettävyyteen ja elinkaarikustannuksiin (Teichert ym. 2023). Sähköisten ajoneuvojen pitkät latausajat nähdään yhtenä suurimmista haasteista raskaiden sähköisten ajoneuvojen yleistymiselle (Anderhofstadt & Spinler 2020).

Latausnopeudella on merkittävä vaikutus vaadittavaan akkukapasiteettiin, sillä pikalataus voi kompensoida vaatimuksia ajoneuvon toimintasäteen osalta (Anderhofstadt & Spinler 2020). Pikalatauksen tehotason tulisi olla 700–800 kW, jotta raskailla kuorma-autoilla pystyttäisiin ajamaan pitkiä matkoja ja lataamaan akusto riittävälle varaustasolle kuljettajien lakisääteisten taukojen aikana (Mareev ym. 2018). Shomanin ym. (2023) mukaan 99 prosenttia Euroopan pitkän matkan kuljetuksista olisi toteutettavissa 750 kWh:n akuilla, mikäli 1,1 MW:n pikalataus olisi käytettävissä taukojen aikana. Schneider ym. (2023) taas arvioivat latauksen tarvittavaksi kapasiteetiksi 761 kW, mikäli akkua ladattaisiin 45 minuuttia 1 MW:n nopeudella 4,25 tunnin välein.

Siinä missä teholatureita tarvitaan maantiekuljetuksissa, alueellisissa kuljetuksissa 1 MW:n megalaturit eivät anna merkittävää etua 350 kW:n pikalatureille lyhyempien ajomatkojen myötä (Bergqvist ym. 2023). Akkujen pikalataus on aiheuttanut huolta akun heikentymisestä, sillä nopeampi lataus voi johtaa akun lyhyempään kokonaiskestoön (Cunanen ym. 2021). Vastaavasti pienempi akku tarvitsee useampia latauskertoja, mikä lyhentää akun elinikää (Nykqvist & Olsson 2021). Koska pikalatauksen kustannukset ovat

yleensä hitaampaa latausta korkeampia, voidaan latausnopeuden mitoittamisella ajoneuvon tarpeisiin edesauttaa kuljetusten kustannustehokkuutta.

4.4.4 Latausinfrastruktuuri

Vaikka teknologian kehitys on nopeasti vahvistanut akkukäyttöisten ajoneuvojen toimintaedellytyksiä, BEV-ajoneuvot kohtaavat edelleen haasteita saavutettavan ajomatkan ja latausinfrastruktuurin osalta (Shahzad & Cheema 2024). Koska ajoneuvojen määrän kasvu nähdään edellytyksenä julkisen infrastruktuurin laajamittaiselle kehittämiselle, on sähköiset ajoneuvot helpointa ottaa käyttöön sellaisissa kuljetuksissa, joissa reitit ja latauspisteet on suunniteltavissa etukäteen (Hall & Lutsey 2019).

Tällä hetkellä merkittävin osa kuljetusyrittäjästä käyttää ajoneuvojen lataamisessa omaan toimipisteeseen sijoitettuja latausasemia siten, että jokaiselle ajoneuvolle on oma latausasemansa (Al-Hanahi ym. 2021). Mikäli ajoneuvoja voidaan ladata yön yli, voidaan riittävät varaustasot saavuttaa 50 kWh:n latureilla (Bergqvist ym. 2023). Hitaalla latauksella akun toimintakyky säilyy paremmin kuin pikalatauksella (Bergqvist ym. 2023) samalla kun infrastruktuuriin käytettävät kustannukset jäävät murto-osaan pikalatureiden kustannuksista (Mareev ym. 2018).

Transport & Environmentin (2021b) mukaan raskaan liikenteen nopea ja laajamittainen sähköistyminen edellyttää kuitenkin latausinfrastruktuuria niin kuljetusyrittäjien omissa toimipisteissä, kuljetusten määränpäissä kuin julkisilla latausasemillakin. Latausverkon tulee kokonaisuudessaan vastata ajoneuvojen tarpeisiin suunnitellun reitin varrella (Shoman ym. 2023). Liimatainen ym. (2019) arvioivat, että julkisten latausasemien avulla raskaiden ajoneuvojen sähköistämispotentiaali kaksinkertaistuu verrattuna ainoastaan yrityksen omassa toimipaikassa tehtävään lataukseen.

Nykyisin käytössä olevilla Combined Charging System eli CCS-latausjärjestelmillä päästään n. 350 kW:n latausnopeuteen. Valtaosa raskaiden ajoneuvojen valmistajista on sitoutunut hyödyntämään tulevaisuudessa BET-ajoneuvoissa testausvaiheessa olevaa Megawatt Charging System eli MCS-latausjärjestelmää, joka mahdollistaa jopa 3,75 MW:n latausnopeuden. (Schneider ym. 2023). MCS käyttää latauksissa yhtenäistä liitinstandardia (CharIN 2022). Toimijoiden sitoutuminen yhteiseen järjestelmään on tärkeää, sillä yhdenmukaisten standardien puute on tuonut merkittäviä haasteita sähköisten ajoneuvojen latausinfrastruktuurin kehittämiselle (Aguilar & Groß 2022).

BET-ajoneuvojen sähköistäminen edellyttää huolellista toimintamatkan ja latausasemien sijainnin arviointia, sillä toteutettavissa oleva matka koostuu sekä akun kapasiteetin mahdollistamasta toimintasäteestä että matkan aikana ladatun energian avulla saadusta lisätoimintamatkasta (Al-Hanahi ym. 2021). Suurin osa ajoneuvojen latauksista tehdään jatkossakin kuljetusyritysten omissa toimipisteissä sekä kuljetusyrityksen kohdepaikoissa, ja julkisilla latausasemilla tehtävien latausten osuudeksi arvioidaan tulevaisuudessa 10–40 prosenttia (Transport & Environment 2023). Latausinfrastruktuurin tulee vastata kuljetusyritysten tarpeisiin tehon lisäksi myös sijainnin osalta, sillä tehokkaan toiminnan takaamiseksi latauspisteiden tulee sijaita taukopaikkojen ja kuljetusten määränpäiden läheisyydessä (Al-Hanahi ym. 2021). Pikalatureiden kattavan infrastruktuurin myötä ajoneuvoissa voidaan käyttää pienempää akustoa, jolloin kuljetuskalustoon tarvittava pääoma on pienempi ja kuljetuksiin käytettävä nettokapasiteetti suurempi kuin raskaalla akustolla (Nykvist & Olsson 2021).

MCS-latausjärjestelmä mahdollistaa sähköisen raskaan liikenteen yhä pidemmillä toimintamatkoilla. Tästä huolimatta Shoman ym. (2023) arvioivat, että 80 prosenttia julkisista latureista voisi olla alle 100 kW:n latureita, jolloin niiden teho riittäisi akun lataamiseen vuorokausilevon aikana. Siitä huolimatta EU:n alueelle tarvittaisiin 9 000 julkista 1 MW:n pikalaturia, mikäli 15 prosenttia ajoneuvoista olisi sähköisiä.

4.4.5 Ympäristövaikutukset

Sähkökäyttöisiä ajoneuvoja kutsutaan usein nollapäästöisiksi. Tällöin puhutaan ajoneuvon käytöstä syntyvistä päästöistä, ja käytettävän energian oletetaan tulevan uusiutuvista energianlähteistä. Sähkön tuotannosta syntyvät todelliset päästöt kuitenkin jäävät usein huomiotta. Ajoneuvojen valmistamiseen tarvitaan lisäksi materiaaleja ja komponentteja, joiden tuotannon synnyttämiä päästöjä ei useinkaan oteta huomioon ympäristövaikutuksia arvioitaessa (Aguilar & Groß 2022; Danielis ym. 2022). Akkuihin käytettävistä raaka-aineista erityisesti litiumin ja koboltin nykyiset tuotantomäärät sekä kokonaisvarannot ovat rajallisia, samalla kun niiden kysyntä on merkittävästi kasvanut (Ding ym. 2019).

Litiumin maailmanlaajuisista varannoista yli puolet sijaitsee Boliviassa ja Chilessä. Vuonna 2025 arviolta noin 70 prosenttia kaikesta tuotetusta litiumista käytetään akkujen tuotantoon (Ding ym. 2019), ja samalla litiumin kysynnän odotetaan kasvavan merkittävästi kaivosten tuotantokapasiteettia suuremmaksi (Aguilar & Groß 2022).

Koboltti mahdollistaa nykyisissä akuissa korkean energiatiheyden, ja valtaosa kaikesta tuotetusta koboltista käytetään akkujen valmistuksessa (Ding ym. 2019). Valtaosa koboltin tuotannosta on keskittynyt Kongon demokraattiseen tasavaltaan (Aguilar & Groß 2022). Koboltti on myrkyllinen raaka-aine, ja sen tuotannossa on havaittu merkittäviä epäkohtia mm. ihmisoikeusloukkausten, lapsityövoiman ja huonojen työolojen osalta. Samalla koboltin käyttö on myös kasvattanut ajoneuvovalmistajien maineriskejä (World Bank 2021). Eettisten ongelmien lisäksi haasteena on koboltin riittävyys, sillä sähköisten ajoneuvojen määrän kasvaessa hyödynnettävät kobolttivarannot voivat ehtyä jo 2030-luvulla (Ding ym. 2019). Tuotannon lisäksi myös koboltin jalostus on keskittynyttä, sillä kaksi kolmasosaa tuotetusta koboltista jalostetaan Kiinassa. Suomi on maailman toiseksi suurin koboltin jalostaja noin 7 prosentin osuudella kokonaismarkkinoista (Statista 2021).

Kierrätetyistä akuista saatavien materiaalien uusiokäyttö tulee yhä tärkeämmäksi osaksi akkujen valmistusta. Akkujen kierrätys ja niistä saatavien materiaalien hyödyntäminen tuovat kuitenkin esiin haasteita, sillä komponenttien ja akkujen suunnittelussa ei ole ollut käytössä yhtenäistä standardia, ja sen myötä niiden valmistamisessa käytetään erilaisia menetelmiä. Lisäksi akkuihin jäänyt energia ja terveydelle haitalliset materiaalit voivat aiheuttaa turvallisuuteen liittyviä riskejä (Aguilar ja Groß 2022). EU onkin määritellyt, että alueella käytettävät akut saavat sisältää vain rajoitetusti haitallisia aineita. Jotta kriittisiä raaka-aineita saadaan hyödynnettyä jatkossakin, kierrätyksen tehokkuudelle, materiaalien talteenotolle ja kierrätysmateriaalin käytölle asetetaan asteittain tiukentuvia tavoitteita vuodesta 2025 alkaen (Euroopan komissio 2023b).

Lajevardi ym. (2019) arvioivat akkukäyttöisten raskaiden sähköajoneuvojen synnyttävän käytössä 62–99 prosenttia dieselajoneuvoja vähemmän kasvihuonepäästöjä. Sähkön tuotannosta syntyvillä päästöillä on kuitenkin huomattava vaikutus kokonaispäästöihin: esimerkiksi Alonso-Villar ym. (2023) arvioivat akkukäyttöisten raskaiden ajoneuvojen päästöjen olevan Islannissa noin 99 prosenttia dieselajoneuvoja alhaisemmat maassa tuotetun sähkön ollessa lähes päästötöntä.

Energian alkuperä on ratkaisevan tärkeää päästöjen vähentämiseksi sähköisessä liikenteessä. Vähäpäästöinen liikenne edellyttää investointeja vähäpäästöisiin uusiutuviin energialähteisiin tai ydinvoimaan (Osieczko ym. 2021).

4.4.6 Käyttö raskaassa liikenteessä

Akkukäyttöisten raskaiden ajoneuvojen on nähty sopivan ensisijaisesti kevyen kuljetuksen tarpeisiin niiden rajallisen kuormakapasiteetin ja toimintamatkan vuoksi. (Lajevardi ym. 2019). Sähköisten ajoneuvojen käyttäminen on toistaiseksi edellyttänyt ajoneuvojen lataamista varikolla, jolloin sähköiset ajoneuvot ovat hyvä vaihtoehto toimintaympäristössä, joissa kuljettavat matkat ovat lyhyitä ja ajoneuvoja voidaan ladata pitkään (Giuliano ym. 2021). Liimatainen ym. (2019) arvioivat sähköisten ajoneuvojen pärjäävän lisäksi kevyempien tavaroiden kuljetuksissa, joissa kuormatilan tilavuus rajoittaa kuljetuskapasiteettia painon sijaan.

BEV-ajoneuvojen hyödynnettävyys on kiinni yrityksen toimintamallista, kuljetusten suunnittelusta, ajoneuvon kantamasta, kuormakapasiteetista sekä tarjolla olevasta latausinfrastruktuurista (Forrest ym. 2020; Tanvir ym. 2021). Eri osa-alueita kehittämällä sähköisiä ajoneuvoja voidaan hyödyntää monipuolisemmin eri kuljetusmuodoissa (Giuliano ym. 2021).

Frenzel ym. (2021) arvioivat sähköisten ajoneuvojen olevan ensisijainen ratkaisu niillä kuljetuksen osa-alueilla, joissa ne vastaavat käyttäjien tarpeisiin. Muiden käyttövoimien mahdollisuuden syntyvät toimintaympäristöissä, joissa sähköiset ajoneuvot eivät ole käyttökelpoisia. Tällöin toimintamatkan ja -kapasiteetin kasvu lisää merkittävästi sähköisten ajoneuvojen toimintaedellytyksiä. Tämä voi kasvattaa edelleen myös pidempiä ja raskaampia kuljetuksia operoivien yritysten suorituskykyä, sillä Nykvistin ja Olssonin (2021) mukaan sähköisten ajoneuvojen kustannustehokkuus voi kasvaa nykytilanteesta poiketen suurimmaksi kaikkein raskaimmissa kuljetuksissa.

Transport & Environment (2021b) arvioi, että vuonna 2030 sähköisten ajoneuvojen osuus raskaan liikenteen myydyistä ajoneuvoista voi olla 20 prosenttia, josta kasvu voi jatkua 40 prosenttiin vuoteen 2035 mennessä. Sähköisten ajoneuvojen valmistajia edustava ACEA (2020) puolestaan esittää, että 15 prosenttia myydyistä raskaista ajoneuvoista voisi vuonna 2030 olla sähköisiä.

Raskaiden ajoneuvojen siirtymässä on huomioitava, että sähköiset ratkaisut toimivat todennäköisemmin kevyemmille ajoneuvoille, joiden päivittäinen toimintamatka on pienempi, jolloin kokonaispäästöt vähenevät suhteellisesti vähemmän kuin sähköisten ajoneuvojen osuus kuljetuksista (Çabukoglu ym. 2018).

4.5 Polttokenno

4.5.1 Moottoriteknologian perusteet

Polttokennoajoneuvot ovat pohjimmiltaan sähkökäyttöisiä hybridiajoneuvoja. Vaikka FCEV-ajoneuvojen voimalinja vastaa pääpiirteissään BEV-ajoneuvoja, FCEV-ajoneuvoissa sähkömoottoreihin välitettävä energia tuotetaan akusta saatavan energian sijasta polttokennojen avulla (Cunanan ym. 2021). Ajoneuvoissa polttokenno muuttaa säiliöihin tankatun polttoaineen, yleisimmin vedyn, ja hapettavan aineen kuten ilman tai puhtaan hapen energiaksi katalyytin avulla. Polttokenno tuottaa ajoneuvolle sähköä, joka johdetaan ajoneuvon moottoriin joko suoraan tai akun välityksellä, ja prosessi tuottaa sivutuotteena lämpöä ja vettä (Ravi & Aziz 2022; Shahzad ja Cheema 2024). Sähkömoottori johdtaa sähköenergian vaihteistoon ja siitä edelleen akseleihin, jotka tuottavat ajovoimaa (Cunanan ym. 2021).

FCEV-ajoneuvoissa käytettävä akku on huomattavasti pienempi kuin BEV-ajoneuvoissa. Akkua käytetään polttokennon käynnistämiseen, saatavan tehon tasaamiseen ja ajossa tarvittavan tehon hallintaan, esimerkiksi lisävoiman tuottamisen matalanopeuksisessa liikenteessä tai ajoneuvoa kiihdytettäessä. Koska polttokenno soveltuu ensisijaisesti tasaisen virran tuottamiseen, akku toimii puskurina sähköjärjestelmässä varastoimalla energiaa ja vapauttamalla sitä tarvittaessa. Akku mahdollistaa myös jarrutusenergian talteenoton. (Cunanan ym. 2021; Aguilar & Groß 2022; Tol ym. 2022)

Polttokennot ovat sähkökemiallisia laitteita, jotka tuottavat sähköä käyttämällä vetyä tai muuta polttoainetta, kuten metanolia tai etanolia. Niissä voidaan hyödyntää erilaisia teknologioita, jotka eroavat toisistaan mm. käytettävän polttoaineen, elektrolyytin ja niiden synnyttämien reaktioiden osalta. Ajoneuvoissa on yleisimmin käytössä vetyä polttoaineena käyttävä protoninvaihtopolttokenno (proton-exchange membrane fuel cell, PEM tai PEMFC) (da Silva Veras ym. 2017). Sen merkittävimmät vahvuudet ovat korkea energiatehokkuus, alhainen käyttölämpötila (50–120 °C), nopea käynnistyminen ja nopea reagointi tehon muutokseen (Aguilar & Groß 2022).

Yunin ym. (2023) mukaan PEMFC-polttokennoilla on kuitenkin haasteita optimaalisen hyötysuhteen saavuttamisessa suurilla tehoilla, jolloin tarvittavan virran määrä kasvaa enemmän kuin tehon tuotanto. Sopivan tasapainon löytäminen tehon ja hyötysuhteen välillä on erityisen haastavaa raskaissa ajoneuvoissa, joissa tarvittavan tehon määrä on

suuri. PEMFC-polttokennoissa rasitteena ovat myös katalyyttikerroksessa käytettävän platinan takia korkeaksi nousevat valmistuskustannukset, ja platinan käyttö vaikuttaa merkittävästi myös FCEV-ajoneuvojen tuottamiin kokonaispäästöihin (Aguilar & Groß 2022).

4.5.2 Käyttövoiman kehityksen nykytila

Polttokennoajoneuvojen osuus kokonaismarkkinoista on edelleen vähäinen. Suurimpina esteinä FCEV-ajoneuvojen yleistymiselle ovat haasteet vedyn tuotannossa, säilyttämisessä ja kuljetuksissa, tankkausinfrastruktuurin vähäisyydessä sekä ajoneuvojen korkeat kokonaiskustannukset (Bergqvist ym. 2023; Shahzad & Cheema 2024). Lisäksi kehityksen esteenä on ajoneuvojen vähäisen määrän luoma ketjureaktio: FCEV-ajoneuvoja ei ole tarpeeksi kannustamaan sijoittajia rakentamaan uusia vedyn tankkausasemia, tankkausinfrastruktuurin puute vähentää edelleen kiinnostusta FCEV-ajoneuvoja kohtaan, mikä taas heikentää valmistajien kiinnostusta kehittää ja markkinoida niitä (Aguilar & Groß 2022).

Haasteista huolimatta vedyllä toimivien ajoneuvojen markkinat ovat olleet viime vuosina merkittävässä kasvussa, ja polttokennoteknologia nähdään kilpailukykyisenä vaihtoehtona nollapäästöiselle liikenteelle (Halder ym. 2024). Vetykäyttöisten ajoneuvojen kokonaismäärä EU:n alueella on muutamia tuhansia (Aguilar & Groß 2022), mutta niiden osuus on kasvanut nopeasti erityisesti raskaissa kuorma-autoissa. Vuonna 2024 vetykäyttöisten myyntimäärä oli jo elokuuhun mennessä 119 kappaletta, kun vuoden 2023 aikana myytyjen ajoneuvojen kokonaismäärä oli 65 (European Alternative Fuels Observatory 2025). Ajoneuvojen määrän kasvu onkin tärkeä kannustin infrastruktuurin kehittämiseen. Tuotantomäärien kasvaessa yksittäisten ajoneuvojen valmistuskustannukset pienenevät, mikä mahdollistaa edelleen ajoneuvojen hintojen laskun ja kysynnän kasvun (Aravindan ym. 2023).

Hyundai on toistaiseksi ollut ainoa suuri valmistaja, joka on tuonut raskaita FCEV-ajoneuvoja yleisesti saataville Euroopan markkinoille. Yrityksen vuonna 2020 markkinoille tuomassa XCIENT Fuel Cell -kuorma-autossa käytettävä paine vedylle on 350 baaria, ja vuonna 2023 markkinoille tuodussa vetoautossa käytettävä paine on nostettu 700 baariin, jolloin 68 kilon tankilla ajoneuvon toimintasäde on 725 kilometriä (Hyundai 2023).

Daimler Truck ja Volvo Group kehittävät polttokennoteknologiaa yhteistyössä yhteisomistuksessa olevan cellcentric-yrityksen kautta (cellcentric 2024). Daimler Truckin testivaiheessa olevalla nesteytetyllä vedyllä toimivalla GenH₂:lla voidaan yltää yli 1000 kilometrin toimintasäteeseen täydellä 40 tonnin painolla (Daimler Truck 2023). Myös Volvo on aloittanut polttokennoteknologiaan perustuvien ajoneuvojen testaamisen vuonna 2023, ja molempien yritysten on tarkoitus tuoda raskaat FCEV-ajoneuvot markkinoille tämän vuosikymmenen jälkimmäisellä puoliskolla (Volvo Trucks 2023b). IVECO ilmoitti vuonna 2023 toimittavansa ensimmäiset IVECO HD FCEV -ajoneuvot liikenteeseen. Toimintasäteeksi tälle 70 kilogramman ja 700 baarin vetysäiliön ajoneuvolle luvattiin 800 kilometriä. (Iveco 2023).

DAF on kehittämässä FCEV-ajoneuvoja yhteistyössä Toyotan kanssa (DAF 2024b), ja suurista valmistajista myös Scania (2022) ja MAN (2024) ja ovat ilmoittaneet kehittävänsä raskaita FCEV-ajoneuvoja. Lisäksi raskaita sähköisiä ajoneuvoja valmistava Nikola sekä FCEV-ajoneuvoihin keskittyvä Hyzon ovat tuoneet omat mallinsa Yhdysvaltain markkinoille (Hyzon 2024; Nikola 2024). Pääosin valmistajien esittelemät mallit käyttävät 350 baariin paineistettua vetyä, jolla teoreettinen toimintasäde jää 400 kilometriin (Basma & Rodríguez 2022).

4.5.3 Käyttövoiman ominaisuudet

Vedyn vahvuus polttoaineena on korkea energiatiheys, joka on painoon suhteutettuna monin kerroin korkeampi kuin muilla polttoaineilla, kuten dieselillä tai maakaasulla. Vety on kuitenkin kaasuna erittäin kevyttä, jonka vuoksi sen hyödyntäminen ajoneuvoissa edellyttää tiivistämistä ja säilytystä korkeassa paineessa tai matalassa lämpötilassa energiatheyden parantamiseksi. Tiiviisti paineistettu tai nesteytetty vety edellyttää kuitenkin korkeampaa painetta kestävä ja samalla painavamman säiliön käyttöä. (Shahzad & Cheema 2024). Samalla se kuitenkin mahdollistaa laajan toimintasäteen vetykäyttöisille ajoneuvoille (Bergqvist ym. 2023).

Polttokennoajoneuvoissa käytettävälle vedylle ei ole olemassa määriteltyä standardia käytettävän tiheyden osalta (Anderhofstadt & Spinler 2020), mutta paineistetun vedyn osalta yleisimmin on käytössä 350 ja 700 baarin paineet. Paineistetun vedyn lisäksi ajoneuvoissa käytettävä vety voidaan varastoida nesteytettynä alle -250 celsiusasteen lämpötilassa. (Choi ym. 2022). Tällöin sen tiheys on 71 kg/m³ (Ahluwalia ym. 2023), joka on huomattavasti korkeampi kuin 350 baarin paineistetulla (28 kg/m³) tai 700 baarin

paineistetulla (40 kg/m^3) vedyllä (Ren ym. 2017). Myös paineistettu nestemäinen vety on noussut potentiaaliseksi säilytysmuodoksi liikenteessä käytettävälle vedylle (Manoharan ym. 2019). Paineistettua nestemäisestä vetyä puristetaan 300 baarin paineeseen ja varastoidaan korkeintaan -150 celsiusasteen lämpötilassa, ja se vastaa tiheydeltään nesteytettyä vetyä (Basma & Rodríguez 2022).

Paineistetun vedyn vahvuutena on sen helppokäyttöisyys ja nopea tankkausaika, mutta sen haasteena on lyhyt toimintasäde. Nesteytetyn ja paineistetun nestemäisen vedyn avulla saadaan tilavuusenergian määrä kaksinkertaistettua, mikä on tärkeää raskaassa liikenteessä pitkien toimintasäteiden saavuttamiseksi. Paineistetun vedyn käyttö on kylmässä säilytettäviä vaihtoehtoja turvallisempaa, sillä äärimmäisen alhainen lämpötila lisää räjähdysvaaraa erityisesti vedyn sekoituessa hapen kanssa, jolloin nesteytetyn typen varastoinnin tulee perustua tyhjiöeristettyyn rakenteeseen turvallisuusriskien vähentämiseksi (Choi ym. 2022). Raskaisiin ajoneuvoihin sijoitettujen vetytankkien materiaaleja ja rakenteita tulee kehittää nykyisestä, jotta niiden turvallisuutta, kestävyyttä, painetta, tilavuutta, tilankäyttöä ja painoa voidaan parantaa (Camacho ym. 2022). Nesteytetyn ja paineistetun nestemäisen vedyn käyttö edellyttää jäähdytyslaitteen asentamista ajoneuvoon, mikä saattaa nostaa ajoneuvon kustannuksia ja monimutkaisuutta (Ravi & Aziz 2022).

Liu ym. (2021) arvioivat 40 tonnia painavien raskaiden ajoneuvojen vedyn kulutuksen olevan noin $8 \text{ kg}/100 \text{ km}$ ja taloudellisuuden paranevan edelleen prosentin vuosittaista vauhtia. Basman ja Rodríguezin (2022) mukaan vetoautojen kulutus on tällä hetkellä $9 \text{ kg}/100 \text{ km}$, mutta kulutus voi laskea $6,6$ kilogrammaan vuoteen 2030 mennessä.

Tankkauksen nopeus voidaan nähdä polttoajoneuvoissa merkittävänä etuna BEV-ajoneuvoihin verrattuna (Cunanan ym. 2021). Hyundai Xcientien tankkausnopeus on $1,6\text{--}4$ kilogrammaa minuutissa, jolloin tankkauksen kesto 32 kilogramman tankille on noin $8\text{--}20$ minuuttia (Basma & Rodríguez 2022). Mohideenin ym. (2023) mukaan raskaiden ajoneuvojen tankkaus onnistuu asemilla alle 10 minuutissa. Tällöin vedyllä toimivissa ajoneuvoissa ei ole vastaavaa tankkauksen keston tuomaa rajoitetta kuin BEV-ajoneuvoissa, mikä nähdään merkittävänä vahvuutena FCEV-ajoneuvojen käytölle (Çabukoglu ym. 2019). On kuitenkin huomioitava, että tankkaustoiminnan aikana korkeapaineisen vedyn nopea täyttö nostaa merkittävästi tankin lämpötilaa kaasun laajenemisen myötä, mikä tuo haasteita tankkaamisen nopeudelle ja polttoainesäiliön ominaisuuksille vaurioiden

estämiseksi. Turvallisuuden takaamiseksi vedyn virtausnopeudeksi suositellaankin Halderin ym. (2024) mukaan korkeintaan 3,6 kg minuutissa.

Vetyä hyödyntävien raskaiden ajoneuvojen kyky täyttää ajokilometrivaatimukset rajoittuvat siis tankattavan polttoaineen määrään ja ajoneuvon polttoainetehokkuuteen (Forrest ym. 2020). Valtaosa markkinoilla ja testivaiheessa olevista polttokennoajoneuvoista sisältää 30–40 kg:n vetoisen tankin, johon voidaan tankata vetyä 350 baarin paineella. Tällöin toimintamatka jää noin 370 kilometriin. Mikäli vedyn paine nostetaan vastaavan kokoisessa tankissa 700 baariin, saadaan toimintamatkaa kasvatettua 600 kilometriin. Vaikka tehokkaammalla hyötysuhteella toimintamatkaa voidaan saada tulevaisuudessa kasvatettua paineistetun kaasun osalta 800 kilometriin, edellyttää yli 1000 kilometrin toimintasäde vedyn nesteyttämistä (Basma & Rodríguez 2022). Toisaalta Kastin ym. (2018) mukaan raskailla ajoneuvoilla reilusti yli 1000 kilometrin matkat olisivat saavutettavissa 350 baarin paineella, mikäli käytössä olisi kaksi 40–60 kilogramman tankkia polttoaineelle. Kuorma-auton vetytankkien tilavuuden tulisi olla 2 000 litraa eli 140 kilogrammaa, jotta energiatilavuus vastaisi dieselajoneuvoa. (Choi ym. 2022). Toisaalta myös 1 000 kilometrin toimintasädettä pidetään yleensä riittävänä, ja tällöin raskaille ajoneuvoille riittäisivät 87 kg vetyä varastoivat nestetankit (Ahluwalia ym. 2023).

4.5.4 Jakeluinfrastrukturi

Edellytyksenä vedyn hyödyntämiselle liikenteessä on sellaisen infrastruktuurin luominen, joka mahdollistaa sen turvallisen kuljetuksen, varastoinnin ja jakelun. Rakentamisen kustannukset voivat olla huomattavia, ja kattavan infrastruktuurin kehittäminen vie aikaa. (Aravindan ym. 2023). Vedyn toimitusketjun kehittäminen on kuitenkin perusedellytys polttokennolla toimivien ajoneuvojen määrän kasvattamiselle (Camacho ym. 2022), ja tällä hetkellä infrastrukturi ei luo edellytyksiä merkittäväälle kasvulle missään päin maailmaa (Rasul ym. 2022). Yksi merkittävämmistä haasteista vedyn jakeluinfrastruktuurin kehittämiselle ja laajentamiselle on sen vaatimat suuret kustannukset. (Halder ym. 2024).

Euroopassa oli helmikuussa 2024 yhteensä 265 vetytankkausasemaa, joista yli 100 sijaitsi Saksassa. Pohjoismaissa tankkausasemia on yhteensä 11, mutta Suomessa ei ole tällä hetkellä käytössä ainuttakaan asemaa (H2stations.org 2024). Cunananin ym. (2021) mukaan kattavan infrastruktuurin puute johtaa korkeisiin polttoainekustannuksiin ja korkeisiin ajoneuvojen pääomakustannuksiin vetykäyttöisissä ajoneuvoissa, mutta kustannusten

odotetaan laskevan tankkauspaikkojen määrän lisääntyessä ja ajoneuvojen määrän kasvaessa.

Paineistetun vedyn säilytys- ja jakelujärjestelmien kehitys paineistetun vedyn osalta mahdollistaa kaupallisen jakelun 350 baarin paineella. 700 baarin tehokkaassa jakelussa on vielä haasteita ennakkoviilennysprosessissa ja kompressioteknologiassa (Basma & Rodríguez 2022), sillä sen jakelu edellyttää esijäähdytystä ylikuumenemisen estämiseksi, mitä ei 350 baarin jakelussa vielä tarvita turvallisuuden takaamiseksi (Ulleberg & Hancke 2020). Samalla nesteytetyn ja paineistetun nestemäisen vedyn jakelu on toistaiseksi vielä kehitysasteella (Basma & Rodríguez 2022). Teknologisena haasteena on vedyn säilytys ja jakelu äärimmäisen alhaisissa lämpötiloissa, mikä samalla nostaa merkittävästi käytön kustannuksia paineistetun vedyn käyttöön verrattuna (Shahzad & Cheema 2024).

Vedyn kuljetuksella tuotantolaitoksesta tankkausasemalle on merkittävä rooli vetyyn perustuvan liikennejärjestelmän taloudellisessa kannattavuudessa. Putkien kautta tapahtuva kuljetus on taloudellisin tapa kuljettaa kaasumaista vetyä suurina määrinä alhaisten ylläpitokustannusten vuoksi erityisesti lyhyemmillä etäisyyksillä, kun taas raskaat ajoneuvot ovat kannattavia nestemäisen vedyn kuljetuksessa (Hurskainen & Ihonon 2020; Halder ym. 2024).

Merkittävin haaste infrastruktuurin kehittämiseksi on kuitenkin vihreän vedyn puute, ja olisi ensiarvoisen tärkeää luoda luotettava ja skaalautuva tapa tuottaa vihreää vetyä massatuotantona. Tällä hetkellä suurin osa vedyn tuotannosta kohdistuu öljynjalostukseen ja kemianteollisuuden vedyn tuotannon pohjautuessa pääasiassa maakaasun käyttöön (Aguilar & Groß 2022).

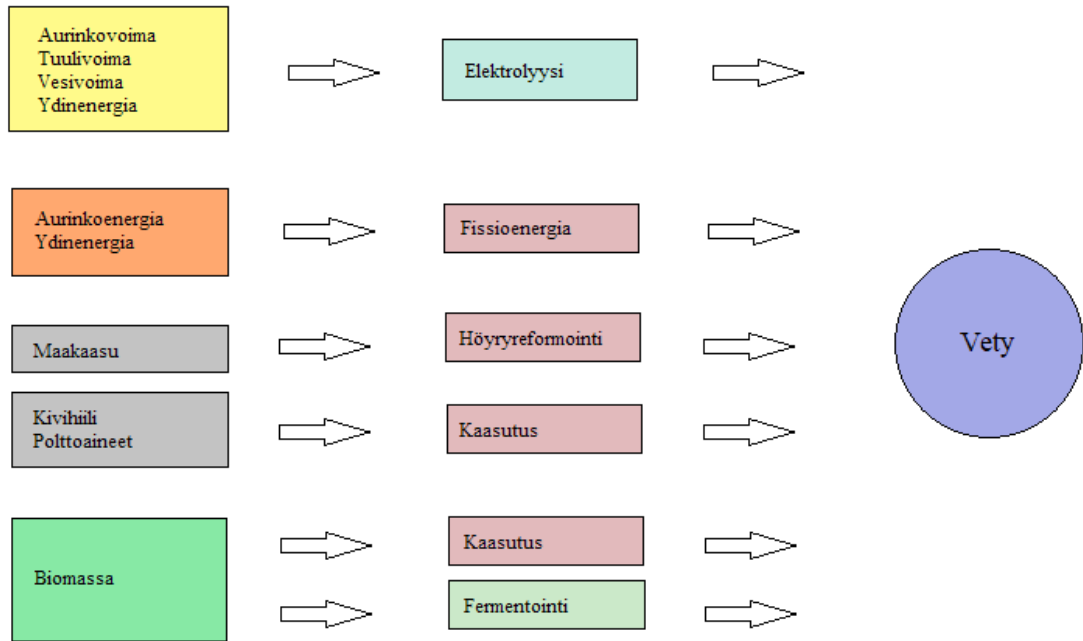
4.5.5 Vedyn tuotanto

Vety on maailmankaikkeuden yleisin alkuaine, ja maapallolla sitä on merkittäviä määriä sitoutuneena veteen ja orgaanisiin materiaaleihin. Sitoutuminen muihin alkuaineisiin tekee kuitenkin vedystä sekundaarisen energian muodon, jota tuotetaan eri teknologioilla erilaisista energianlähteistä. Vaikka vedyllä on merkittävä potentiaali energian varastoinnissa, vedyn kustannustehokas erottaminen on osoittautunut haasteelliseksi (Tsakiris 2019; Lajevardi ym. 2019).

Vetyä voidaan tuottaa joko lämpö-, sähkö- ja biokemiallisten prosessien avulla.

1. Lämpökemiallisissa prosesseissa kuten höyryreformoinnissa ja kaasutuksessa vetyä tuotetaan korkeissa lämpötiloissa kemiallisten reaktioiden aikaansaamiseksi. Höyryreformoinnissa hiilipohjainen raaka-aine reagoi höyryn kanssa korkeissa lämpötiloissa ja paineissa katalyytin avulla, jolloin syntyy vetyä ja sivutuotteena hiilidioksidia. Kaasutuksessa kiinteä polttoaine puolestaan kuumennetaan hapettavan aineen läsnä ollessa, mikä tuottaa vetyä sisältävää tuotekaasua. Lämpökemialliset prosessit perustuvat yleisimmin orgaanisten raaka-aineiden kuten maakaasun käyttöön, jolloin vedyn tuottaminen aiheuttaa päästöjä. Mikäli syntyviä hiilidioksidipäästöjä saadaan otettua talteen tai raaka-aineena käytetään tuotannon sivuvirtoina syntyvää biomassaa, voidaan vetyä tuottaa ekologisesti kestäväällä tavalla (da Silva Veras ym. 2017; Aravindan ym. 2023).
2. Sähkökemiallisissa prosesseissa kuten elektrolyysissä vetyä tuotetaan hajottamalla vesi vedyksi ja hapeksi sähkövirran avulla. Menetelmästä käytetään myös nimitystä power-to-hydrogen (P2H). Vaikka päästöt rajoittuvat tällöin sähköenergian tuotannossa syntyneisiin päästöihin, jolloin se on uusiutuva energianlähteitä käytettäessä päästötöntä, on sähkökemiallisten prosessien haasteena suhteellisen alhainen hyötysuhde ja korkeat tuotantokustannukset verrattuna hiilivetyjen reformointiin (da Silva Veras ym. 2017; Nemmour ym. 2023).
3. Biokemiallisissa prosesseissa kuten biofotolyysissä mikro-organismit hajottavat veden vedyksi auringonvalosta saatavan energian avulla. Lisäksi biokemiallisiin prosesseihin lukeutuu mädättämällä tuotettu biokaasu ja sen jalostaminen vedyksi (da Silva Veras ym. 2017).

Orgaanisten raaka-aineiden käyttö vedyn tuotannossa perustuu pääasiassa lämpökemiallisten reaktioiden hyödyntämiseen, kun taas päästöttömän vedyn tuotanto perustuu ensisijaisesti sähkökemiallisiin tai biokemiallisiin tuotantoprosesseihin (da Silva Veras ym. 2017) (ks. kuva 6).



Kuva 6. Vedyn tuotantomenetelmiä. Mukailleen da Silva Veras ym. (2017) ja Halder ym. (2024).

Vedyn tuotantoteknologioiden taloudellinen kannattavuus riippuu useista tekijöistä, kuten pääoma- ja käyttökustannuksista, energiatehokkuudesta, skaalautuvuudesta sekä raaka-aineiden saatavuudesta (Aravindan ym. 2023). Tällä hetkellä lähes kaikki valmistetusta vedystä tuotetaan lämpökemiallisilla prosesseilla pääasiassa maakaasusta ja öljystä, joskin biomassan käytön odotetaan yleistyvän käytettävänä raaka-aineena (Halder ym. 2024). Orgaanisten raaka-aineiden käytön suosion taustalla on tuotannon alhaisemmat kustannukset, sillä vihreän vedyn hinta voi olla niihin verrattuna moninkertainen. Kehittyvän teknologian odotetaan mahdollistavan vihreän vedyn tuotantokustannusten laskun samalle tasolle mustan ja harmaan vedyn kanssa (Aravindan ym. 2023). Kustannusten vähentäminen vedyn tuotannossa on tärkeää, sillä se on edellytys vedyllä toimivan infrastruktuurin luomiselle (Rasul ym. 2022).

Elektrolyysiin pohjautuva vihreä vety mahdollistaisi monin kerroin nykyistä suuremmat kokonaistuotantomäärät (Halder ym. 2024). Tällä hetkellä elektrolyysillä tuotetun vedyn osuus on ainoastaan neljä prosenttia kokonaisvedyntuotannosta (Nemmour ym. 2023). Elektrolyysin merkittävimpiä haasteena on menetelmän suuri sähkönkulutus, joka aiheuttaa arviolta 90 prosenttia kokonaiskustannuksista (Halder ym. 2024). Esimerkiksi Çabukoglu ym. (2019) arvioivat, että Sveitsissä sähkönkulutus kasvaisi 13 prosenttia, mikäli kaikki raskaat ajoneuvot kulkisivat elektrolyysin avulla valmistetulla vedyllä.

Energiankulutuksen lisäksi makean veden käyttö voi tuottaa haasteita vedyn tuotannolle (Halder ym. 2024).

Polttokennolla toimivien raskaiden ajoneuvojen vahvuus akkukäyttöisiin sähköisiin ajoneuvoihin syntyy pidemmästä toimintasäteestä (Berylls Strategy Advisors 2021). Vedyn tuotannon lisäksi vedyn nesteyttäminen on tärkeää pidemmän toimintasäteen takaamiseksi. Vedyn muuntaminen nestemäiseksi äärimmäisen kylmissä lämpötiloissa vaatii kuitenkin nykyteknologialla huomattavasti energiaa, sillä käytettävän energian osuus on 40 prosenttia vedyn energiasisällöstä. Suuri energian tarve kasvattaa samalla myös tuotannon kustannuksia (Rasul ym. 2022). Kehitteillä olevien teknologioiden avulla tarvittavan energian osuus voitaisiin puolittaa, mutta energian tarve muuntamisessa pysyisi edelleen korkeana (Yang ym. 2023). Kun nestemäistä vetyä varastoidaan säiliöissä tai tankeissa, osa vedystä haihtuu lämpenemisen myötä. Tämä kasvattaa edelleen nestemäisen vedyn hävikkiä (Aravindan ym. 2023).

4.5.6 Ympäristövaikutukset

Polttokennokokäyttöiset raskaat ajoneuvot tarjoavat tehokkaan tavan vähentää raskaan ajoneuvokannan aiheuttamia kasvihuonepäästöjä (Liu ym. 2021), sillä ne mahdollistavat kuljetukset ilman suoria päästöjä ainoan liikennöinnistä ilmakehään vapautuvan kaasun ollessa vesihöyry (Aguilar & Groß 2022). Toisaalta vedyn tuotantoa elektrolyysillä voidaan pitää tehottomana, sillä sähköön muuntaminen vedyksi aiheuttaa merkittävästi energiahävikkiä. (Bergqvist ym. 2023) Elektrolyysillä tuotetun vedyn valmistaminen edellyttää primäärienergianlähteen kuten tuuli- tai aurinkoenergian muuntamisen ensin sähköksi. Jokainen energian muuntamisvaihe aiheuttaa hävikkiä. Tällöin vedyn valmistaminen sähköä hyödyntämällä edellyttää yhden muutosvaiheen lisää, samoin kuin vedyn muuntaminen polttokennon avulla jälleen sähköenergiaksi. Tämän vuoksi polttokennoajoneuvojen kokonaisenergiatehokkuus voi jäädä merkittävästi akkukäyttöisiä ajoneuvoja heikommaksi (Ligen ym. 2018; Aguilar ja Groß 2022).

Vedyn merkitys päästöjen vähentämisessä tulee määritellä sen valmistuksessa syntyvien päästöjen pohjalta (Lajevardi ym. 2019), sillä vedyn tuotanto on hiilineutraalia ainoastaan silloin, kun tuotanto tapahtuu päästöttömällä sähköllä (Shahzad & Cheema 2024). Vetyä voidaan tuottaa lukuisista eri lähteistä, kuten fossiilisista polttoaineista, orgaanisista jätteistä ja vedestä erilaisten prosessien avulla. Eri lähteistä ja eri tuotantoprosesseilla tuotettua vetyä voidaan luokitella eri väreillä (Halder ym. 2024). Määrittelyissä on eroa eri

lähteiden välillä, mutta värikoodit voidaan jakaa esimerkiksi Aguilaria ja Großia (2022), Ravia ja Azizia (2022), Aravindania ym. (2023) sekä Halderia ym. (2024) mukailten seuraavasti:

- musta eli kivihiilestä kaasuttamalla tuotettu vety
- ruskea eli ruskohiilestä kaasuttamalla tuotettu vety
- harmaa eli maakaasun sisältämästä metaanista höyryreformoinnilla tuotettu vety
- sininen eli biomassan sisältämästä metaanista höyryreformoinnilla tuotettu vety tai maakaasun sisältämästä metaanista höyryreformoinnilla tuotettu vety, jossa hiilidioksidipäästöt on otettu talteen
- turkoosi eli maakaasun sisältämästä metaanista metaanipyrolyysillä valmistettu vety, jossa sivutuotteena syntyy kiinteää hiiltä ilman päästöjä
- vaaleanpunainen tai keltainen eli vedestä elektrolyysillä tuotettu vety, jossa käytettävä energia on tuotettu ydinvoimalla
- vihreä eli vedestä elektrolyysillä tuotettu vety, jossa käytettävä energia on tuotettu uusiutuvilla energianlähteillä.

Nykyisen vedyntuotannon ongelmana on sen korkeat päästöt (Halder ym. 2024). Jos vetyä tuotetaan höyryreformoinnilla, tuotannosta syntyvien päästöjen myötä polttokennoajoneuvojen kokonaispäästöt pysyvät suunnilleen samalla tasolla dieselajoneuvojen kanssa (Çabukoglu ym. 2019). Vaikka hiilidioksidipäästöjen talteenotto on nähty keinona vähentää höyryreformoinnista syntyviä kokonaispäästöjä, menetelmän käyttöön liittyy merkittäviä taloudellisia, teknologisia ja sosiaalisia haasteita (Rasul ym. 2022).

Elektrolyysillä tuotetun vedyn osuus on toistaiseksi kokonaistuotannosta vähäistä, ja sen edellyttämän sähkön tuotanto perustuu merkittävässä määrin hiilidioksidipäästöjä synnyttäviin tuotantolaitoksiin. (Liu ym. 2021). Elektrolyysillä tuotettu vety ei nykyisellään ole Euroopan energiantuotantojakaumalla juurikaan kaasusta höyry-metaanireformoinnilla tuotettua vetyä vähäpäästöisempää (Aguilar & Groß 2022).

4.5.7 Käyttö raskaassa liikenteessä ja vedyn muut käyttösovellukset

Vuonna 2021 noin 95 prosenttia tuotetusta vedystä kulutettiin öljynjalostuksessa sekä ammoniakkin ja metanolin tuotannossa (Halder ym. 2024). Perinteisten kuorma-autojen korvaaminen polttokenokäyttöisillä ajoneuvoilla edellyttää sähköntuotannon määrän kasvattamista elektrolyysillä tuotetun vedyn valmistamiseksi ja lisäksi infrastruktuurin vedyn tuotantoa, säilöntää ja jakelua varten. Mikäli nämä haasteet saadaan ratkaisua, polttokenokäyttöisillä kuorma-autoilla on akkukäyttöisiä korkeampi tekninen potentiaali raskaissa kuljetuksissa pidemmän toimintasäteen myötä (Çabukoglu ym. 2018; Tsakiris 2019).

Vetyä voidaan käyttää polttokenojen lisäksi myös polttomoottorien polttoaineena (Rasul ym. 2022). Volvo ilmoitti keväällä 2024 tuovansa markkinoille vetyä hyödyntävien polttokenoajoneuvojen lisäksi polttomoottorikuorma-autoja, joissa käytetään vetyä. Yrityksen tavoitteena on aloittaa ajoneuvojen testaus liikenteessä vuonna 2026 ja tuoda ajoneuvot markkinoille vielä tämän vuosikymmenen sisällä. Ajoneuvojen moottorit perustuvat HPDI-teknikkaan, jossa käytetään dieseliä polttoaineen sytykkeenä (Volvo Trucks 2024b). Myös DAF on esitellyt oman vedyllä toimivan DAF HF -polttomoottoriajoneuvonsa (DAF 2024b), ja MAN on toimittamassa vedyllä toimivia polttomoottoriajoneuvoja asiakkailleen vuodesta 2025 alkaen (MAN 2024). Vedyn hyödyntämisessä polttomoottoriajoneuvoissa on kuitenkin myös omat haasteensa turvallisuuden osalta mm. sen helpon syttyvyyden takia (Ravi & Aziz 2022).

Fischer–Tropsch-prosessilla vedystä johdetut nestemäiset e-polttoaineet on nähty myös vaihtoehtoina vedyn sisältämän energian hyödyntämiseksi raskaassa liikenteessä (Unglert ym. 2020; Sens ym. 2024). E-polttoaineita voidaan hyödyntää voimanlähteenä maantieliikenteessä lisäksi myös lentoliikenteessä, laivoissa tai junissa (Ravi & Aziz 2022).

Vetyyn pohjautuvia energiaratkaisuja on tulevaisuudessa suunniteltu liikenteen lisäksi laajalti eri teollisuudenaloille (Aguilar & Groß 2022), ja vedyn kokonaiskysynnän odotetaan kasvavan moninkertaiseksi tulevina vuosikymmeninä (Sens ym. 2024). Vety nähdään erityisesti potentiaalisena keinona uusiutuvan energian varastoinnille ja myöhemmälle käytölle (Liu ym. 2021), sillä mm. tuuli- ja aurinkovoiman tuotantomäärissä on merkittävää vaihtelua (Aravindan ym. 2023). Toisaalta vedyn rooli tulevaisuuden energiaratkaisuissa on herättänyt kritiikkiä erityisesti sen energiaintensiivisyyden takia, ja mm. Bergqvist ym. (2023) arvioivat, että vihreää sähköä voitaisiin hyödyntää

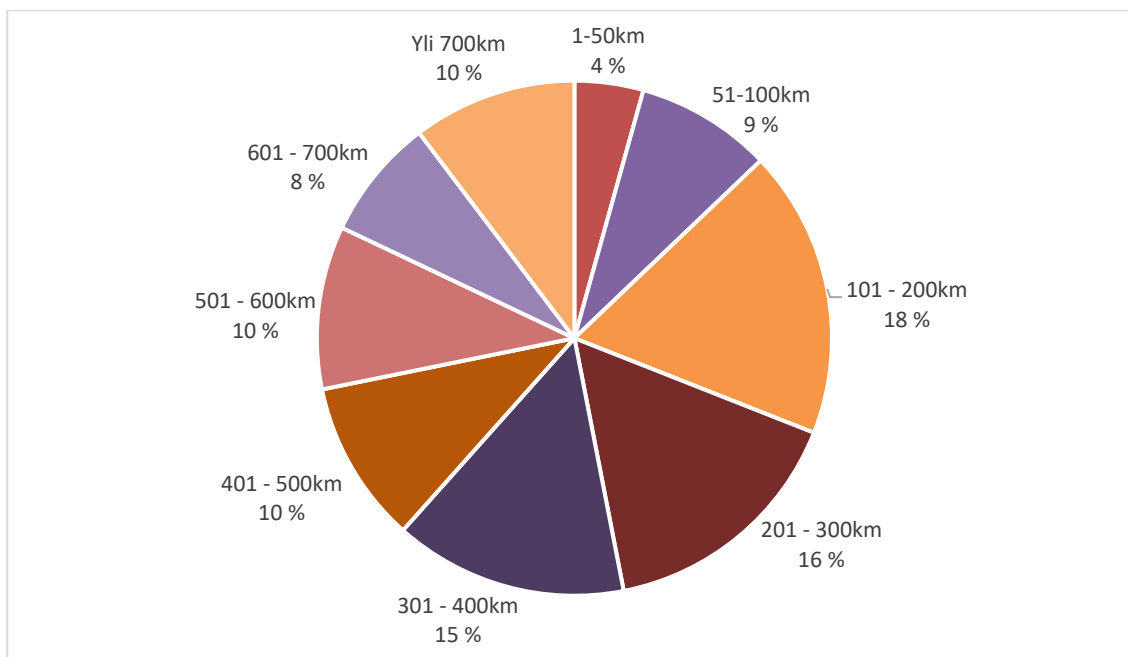
tehokkaamminkin kuin vetypohjaisten ratkaisujen kautta. Vedyn laajamittainen hyödyntäminen edellyttääkin merkittävää lisäystä sähköntuotannon määrään pelkästään liikenteen osalta (Nemmour ym. 2023).

Euroopan komission, polttonenno- ja vetyteollisuuden sekä tutkijayhteisön muodostama Clean Hydrogen Partnership (2019) on laatinut strategian vedyn tuotannon lisäämiselle. Sen tavoitteena on lisätä tuotantoa siten, että vuoteen 2050 mennessä voitaisiin vähentää merkittävästi hiilidioksidipäästöjä erityisesti niiltä sektoreilta, joilta päästöjen vähennys on toistaiseksi ollut vaikeinta. Julkisen sektorin aktiivinen rooli vetyteollisuuden kehittämisessä nähdään ensisijaisen tärkeänä markkinoiden kasvun, kilpailun ja kustannusten alenemisen näkökulmasta.

5 Raskas tavaraliikenne Suomessa

5.1 Suomen tavaraliikenteen yleiskuvaus

Kuorma-autoliikenteellä on suuri merkitys Suomen taloudelle, sillä yli 80 prosenttia kaikesta kuljetetusta tavaramäärästä kuljetetaan maanteitse (Liimatainen ym. 2023). Tiekuljetukset ovat osa lähes kaikkia toimitusketjuja, ja kuorma-autoliikenne mahdollistaa monipuolisen palvelutarjonnan erilaisille kuljetusmäärille kymmeneen tonniin asti. Samalla ala on erittäin kilpailtua, mikä aiheuttaa haasteita toiminnan kannattavuudelle ja vaikeuttaa samalla sekä toiminnan että palvelujen kehittämistä. Tieliikenteessä tehtyjen tavarakuljetusten kokonaismäärä oli vuonna 2022 241 miljoonaa tonnia. (Traficom 2024b). Suomessa pitkien välimatkojen myötä kuljetussuoritteista yli puolet muodostuu yli 300 kilometrin kuljetuksista (kuva 7).



Kuva 7. Kuorma-autoliikenteen suoritteet Suomessa 2023 kuljetusetäisyyden mukaan ilman maaineksia (Tilastokeskus 2025a).

Maantieliikenteen kuljetussuoritteista 75 prosenttia kuljetetaan ajoneuvoyhdistelmillä eli kuorma-auton ja puoliperävaunun tai varsinaisen perävaunun muodostamilla ajoneuvoyhdistelmillä (Liimatainen ym. 2023). Kuorma-autoliikenteen kokonaismäärästä ajoneuvoyhdistelmien osuus maantieliikenteessä on noin 60 prosenttia. Ajoneuvoyhdistelmien suhteellinen osuus on pienin eteläisen Suomen väkirikkaimmissa maakunnissa eli

Uudellamaalla, Varsinais-Suomessa ja Pirkanmaalla sekä Lapissa, kun taas Kaakkois-Suomessa ajoneuvoyhdistelmien osuus on jopa 77 prosenttia (Rajamäki & Lahti 2022).

Liikenteellä on merkittävä rooli julkisessa taloudessa niin valtion kuin kuntienkin näkökulmasta. Valtio kerää liikenteeseen kohdistuvia verotuloja noin 4,5 miljardia euroa vuodessa, mikä on noin 10 prosenttia kaikista valtion veroista. Samanaikaisesti liikenne aiheuttaa huomattavia menoja: liikenneväylien kehittämiseen ja ylläpitoon käytetään valtion ja kuntien toimesta noin 3,4 miljardia euroa. (Liimatainen ym. 2023).

5.1.1 Raskaan liikenteen ajoneuvokanta

EU:n raskaiden ajoneuvojen mitat ja massat määritellään direktiivissä 96/53/EY. Raskaiden ajoneuvojen puoliperävaunun maksimipituudeksi määritellään 15,65 metriä ja ajoneuvoyhdistelmän kuormatilojen maksimipituudeksi 13,6 metriä. Samalla yleiseksi maksimipainoksi tieliikenteessä määritellään 40 tonnia (Euroopan unionin neuvosto 1996). Direktiivi mahdollistaa kuitenkin jäsenvaltioiden sallivan liikenteessään edellä mainittuja arvoja suurempia yhdistelmiä, kunhan ne koostuvat direktiivissä mainituista niin kutsutuista moduulimittaisista osista (Heinonen 2017). Siinä missä suurimmassa osassa EU-maita on käytössä direktiivissä määritetyt painorajoitukset (International Transport Forum 2022), Suomessa on hyödynnetty direktiivin suomia mahdollisuuksia raskaampien ajoneuvoyhdistelmien sallimiseksi niin, että Suomessa raskaan liikenteen kuljetuskalustolla on käytössä EU-alueen suurimmat pituudet ja massat (SKAL 2023a).

Suomessa raskaiden ajoneuvojen suurin sallittu kokonaismassa on kasvanut tasaisesti viimeisten vuosikymmenten aikana. Vuonna 1975 suurimmaksi kokonaismassaksi määriteltiin 42 tonnia, vuonna 1982 48 tonnia ja vuonna 1990 sallittu kokonaismassa nousi 56 tonniin. Vuonna 1997 otettiin huomioon direktiivin 96/53/EY:n vaatimukset, jolloin täysperävaunuyhdistelmien maksimipituudeksi määriteltiin Suomessa 25,25 metriä ja suurimmaksi sallituksi kokonaismassaksi 60 tonnia, ja vuonna 2013 korkein sallittu kokonaismassa nostettiin 76 tonniin. (Heinonen 2017). Vuodesta 2019 liikenteessä sallittu jopa 34,5-metriset HCT-yhdistelmät (Traficom 2019).



Kuva 8. Esimerkkejä Suomessa liikenteessä yleisesti käytettävistä ajoneuvoyhdistelmistä (kuormatilojen kokoineen): a) puoliperävaunuyhdistelmä (13,5 metriä), b) täysperävaunuyhdistelmä (7,5 + 13,5 metriä) c) HCT-yhdistelmä (13,5 + 13,5 metriä) ja d) HCT-yhdistelmä (7,5 + 7,5 + 13,5 metriä). Mukailten Murto (2018).

5.1.1.1 Puoliperävaunuyhdistelmä

Puoliperävaunuyhdistelmät koostuvat vetoautosta ja puoliperävaunusta. Vetoautossa ei itsessään ole kuormatilaa, vaan ajoneuvo on varustettu vetopöydällä, johon puoliperävaunu kytketään kiinni vetotapin avulla. Yleisesti suomalaisissa tutkimuksissa ja vertailuissa käytetty puoliperävaunuyhdistelmän 48 tonnin kokonaisuudessa perustuu ennen ajankohtaa 1.6.2020 käytössä olleeseen tieliikennelakiin, jossa kolmeakselisen vetoauton maksimimassaksi määriteltiin 26 tonnia, puoliperävaunuyhdistelmän suurimmaksi sallituksi massaksi 48 tonnia sekä yhdistelmän suurimmaksi sallituksi pituudeksi 16,5 metriä, leveydeksi 2,6 metriä ja korkeudeksi 4,4 metriä (Heinonen 2017). Puoliperävaunuyhdistelmissä käytetään pääsääntöisesti standardisoituja kolmeakselisiä, sisämitaltaan 13,6 metrin pituisia perävaunuja (DB Schenker 2020), joskin kesäkuusta 2020 liikenteessä on sallittu noin 22 metrin pituiset puoliperävaunuyhdistelmät (Lahti 2021).

5.1.1.2 Täysperävaunuyhdistelmä

Täysperävaunuyhdistelmä koostuu kuormatilallisesta kuorma-autosta ja perävaunusta. Perävaunu voi olla ns. varsinainen perävaunu, jolloin perävaunussa on vähintään yksi

akseli sekä vaunun etu- että takaosassa, tai vaihtoehtoisesti dollysta ja puoliperävaunusta muodostettu varsinaisen perävaunun kaltainen yksikkö. Suomessa ja Ruotsissa ajoneuvoyhdistelmän suurin sallittu pituus on ennen 1.6.2020 voimaan tullutta lakimuutosta ollut 25,25 metriä, jonka myötä merkittävä osa liikennöitävistä yhdistelmistä sisältää 7,40–7,82 metriä pitkän kuormatilan ja 13,60 metriä pitkän perävaunun. (Heinonen 2017; DB Schenker 2020).

5.1.1.3 HCT-yhdistelmä

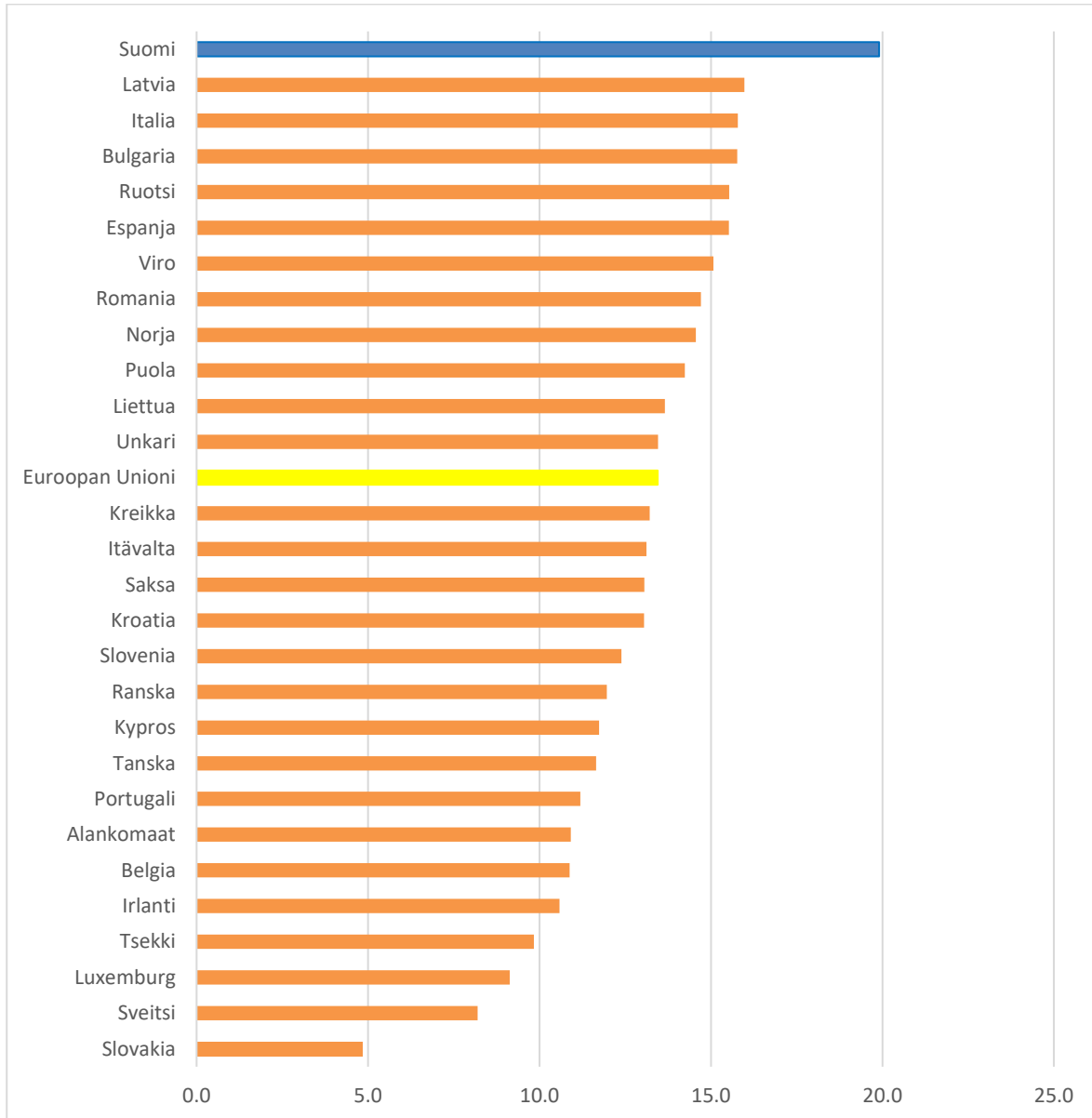
HCT-ajoneuvoyhdistelmillä tarkoitetaan ajoneuvoyhdistelmiä, joiden pituus ja/tai massa ovat tavallisia täysperävaunuyhdistelmiä suurempia. HCT-yhdistelmiksi määritellään tällöin yli 25,25 metriä pitkät ajoneuvoyhdistelmät (Heinonen 2017). Vuoden 2019 alussa voimaan tullut lakimuutos mahdollisti yleisen liikennöinnin niin kutsutuilla High Capacity Transport eli HCT-rekoilla, joiden maksimipituus on 34,5 metriä. HCT-yhdistelmien painoraja on 76 tonnia, mutta erikoisluvalla liikenteessä on sallittu jopa 104 tonnin yhdistelmiä (Traficom 2019; Venäläinen 2019).

HCT-yhdistelmät mahdollistavat suuremmat kuljetuskapasiteetit, jolloin ajoneuvoihin voidaan lastata painoltaan ja/tai tilavuudeltaan enemmän tavaraa. Korkeamman kapasiteetin avulla saadaan vähennettyä kustannuksia ja päästöjä kuljetettua tonnikipometriä kohden, sillä sama määrä tavaraa saadaan kuljetettua pienemmällä kalustomäärällä. HCT-yhdistelmien kustannustehokkuuden kannalta on tärkeää, että lisäkapasiteetti tulee käyttöön. Yritysten tulee kohdistaa HCT-yhdistelmät reiteille, joilla kuljetetaan säännöllisesti suuria tavaramääriä. (Lindqvist ym. 2020). HCT-yhdistelmien kannattavuudelle on olennaista, kuinka korkealla täyttöasteella niillä operoidaan. HCT-yhdistelmiä on Suomessa onnistuttu kohdistamaan kuljetuksiin siten, että täyttöasteet on saatu pidettyä korkeana kasvaneesta kapasiteetista huolimatta. Näin ollen lisäkapasiteetti on kasvattanut kuljetusten tehokkuutta. (Solakivi ym. 2023).

5.1.2 Ajoneuvokannan ominaispiirteet Suomessa

Suomessa käytössä oleva raskaan liikenteen kalustokanta poikkeaa korkeampien sallittujen kokonaismassojen ja -pituuksien myötä huomattavasti muualla Euroopassa käytettävästä raskaasta kalustosta. Suomessa liikennekäytössä oli vuoden 2023 lopussa 90 100 kuorma-autoa, joista 29 690:ää voitiin käyttää ajoneuvoyhdistelmän vetoautona, eli ne varustettu joko vetokytkimellä tai vetopöydällä. Valtaosa luvanvaraisessa eli

kaupallisessa liikenteessä käytössä olevista 32 600 raskaasta ajoneuvosta oli ajoneuvoyhdistelmiä: 18 prosenttia oli puoliperävaunun vetoautoja ja 52 prosenttia varsinaisen tai keskiakseliperävaunun vetoautoja. (SKAL 2024).



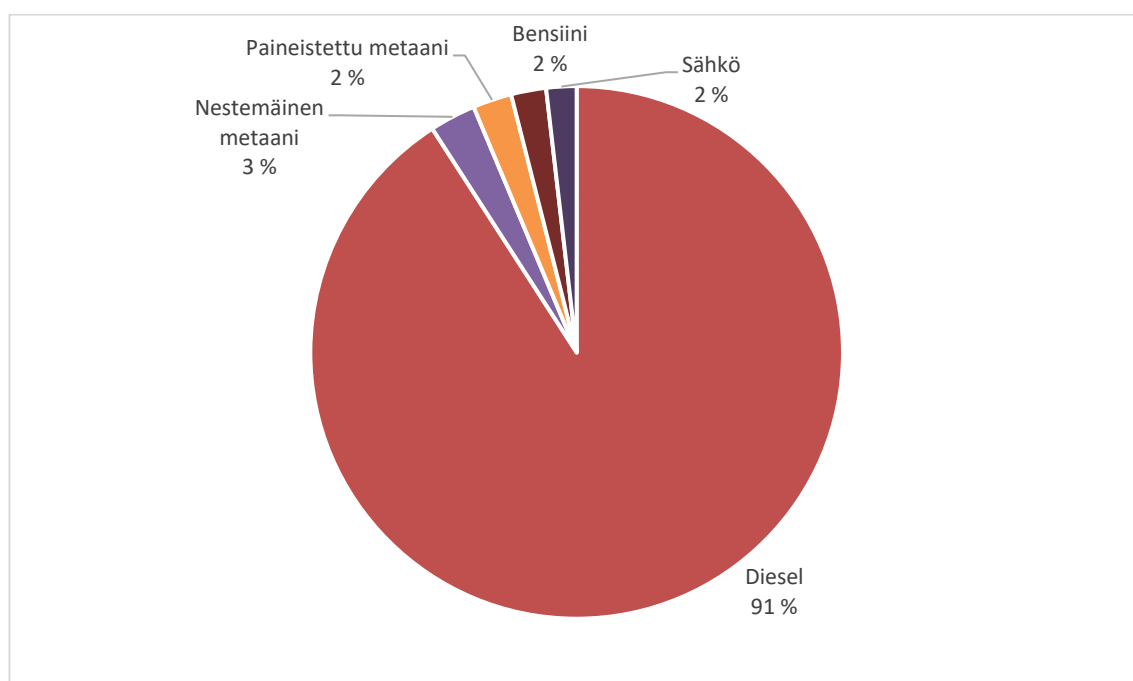
Kuva 9. Tavaraliikenteen keskimääräiset tonnikuormat maiden sisäisissä maantiekuljetuksissa eri Euroopan maissa 2023 (Eurostat 2025).

Suomessa käytettävä ajoneuvokanta poikkeaa huomattavasti yleisesti Euroopasta käytetystä raskaan liikenteen kalustokannasta, sillä useimmissa Euroopan maissa raskaassa liikenteessä on sallittu korkeintaan 40 tonnin puoliperävaunuyhdistelmät (International Transport Forum 2022). Siinä missä Euroopassa 29,6 prosenttia kaikista kuljetetuista tonnikilometreistä kuljetetaan yli 40 tonnin ajoneuvoilla, Suomessa osuus on 87,4 prosenttia

(Eurostat 2024c). Suomessa kuorma-autot kuljettavatkin keskimäärin 19,9 tonnia rahtia ajettua kilometriä kohden, mikä on noin 50 prosenttia enemmän kuin Euroopan maissa keskimäärin (kuva 9). Raskaan liikenteen verrattain korkeat kapasiteettirajoitukset ovat lisänneet tiekuljetusten kilpailukykyä suhteessa muihin kuljetusmuotoihin (Traficom 2025).

5.1.3 Vaihtoehtoisten käyttövoimien osuus

Vuonna 2022 arviolta 0,6 prosenttia Suomen kuorma-autokannasta oli kaasu- tai sähkökäyttöisiä (SKAL 2023a). Muiden kuin dieselkäyttöisten kuorma-autojen osuus on kuitenkin kasvanut vuosi vuodelta, ja vuonna 2024 ensirekisteröidyistä kuorma-autoista 9 prosenttia oli muita kuin dieselajoneuvoja (kuva 10). Näistä kaasuajoneuvojen osuus oli 5 prosenttia ja sähköajoneuvojen osuus 2 prosenttia. (Tilastokeskus 2025b). Loput 2 prosenttia rekisteröinneistä oli bensiinikäyttöisiä kuorma-autoja, jotka ovat painonsa takia pääasiassa kuorma-autoiksi rekisteröityjä avolava-autoja (SKAL 2023a).



Kuva 10. Kuorma-autojen vuoden 2024 ensirekisteröinnit Suomessa käyttövoiman mukaan (Tilastokeskus 2025b).

Vaihtoehtoisten käyttövoimien osuus korostuu kevyemmissä kuorma-autoissa, sillä ajoneuvoyhdistelmissä sähkön ja kaasun suhteelliset osuudet ovat merkittävästi dieseliä alhaisempia. Siinä missä vuonna 2023 luvanvaraiseen liikenteeseen rekisteröidyistä

dieselkuorma-autoista 71 prosenttia oli varustettu vetolaitteella, kaasukuorma-autoista vetolaitteella oli varustettu 59 prosenttia ja sähkökuorma-autoista ainoastaan 6 prosenttia (SKAL 2024). Vaihtoehtoisten käyttövoimien osuutta kasvattamalla erityisesti suurimmissa painoluokissa voidaan Suomen raskaan liikenteen päästöjä saada vähennettyä merkittävästi, millä on samalla huomattava vaikutus liikenteen kokonaispäästöjen vähentämiseen (Traficom 2025).

5.2 Ilmasto-olosuhteet

Talviset olosuhteet voivat vaikuttaa merkittävästi ajoneuvojen kulutukseen. Raskaissa ajoneuvoissa talviset olosuhteet lisäävät renkaiden vierintävastusta ja ilmanvastusta, minkä lisäksi sähköisissä ajoneuvoissa kulutusta lisää myös akun lämpötilan hallitseminen ja ohjaamon lämmittäminen. Polttomoottoriajoneuvojen polttoaineen kulutus voi nousta -7 celsiusasteessa 15 prosenttia korkeammaksi kuin kesälämpötiloissa, ja sähköisillä ajoneuvoilla kulutus voi kasvaa jopa 40 prosenttia (U.S. Department of Energy 2024). Sähköisten ajoneuvojen korkeampi energiankulutus selittyy ensisijaisesti akkujärjestelmän tehokkuuden laskulla kylmissä lämpötiloissa (Tol ym. 2022). Akkukäyttöisissä sähköajoneuvoissa käytetäänkin BTMS-järjestelmää (Battery Thermal Management System), jonka tehtävänä on ylläpitää akkukennojen lämpötila niiden optimaalisen toiminta-alueen sisällä turvallisen ja tehokkaan toiminnan varmistamiseksi. (Alonso-Villar ym. 2023).

Suomessa ilmasto-olosuhteet ovat merkittävin liikenneympäristöön vaikuttava maantieteellinen ominaispiirre. Pohjoinen sijainti vaikuttaa merkittävästi ajoneuvojen kulutukseen talven ollessa on kaikista vuodenaajoista pisin terminen vuodenaika. Termisen talven aikana vuorokauden keskilämpötila laskee pysyvämmiin nollan asteen alapuolelle. Lounasrannikolla talven pituus on keskimäärin noin neljä kuukautta, kun pohjoisimmassa Suomessa terminen talvi kestää yli kuusi kuukautta (Ilmatieteen laitos 2025a). Siinä missä Etelä-Suomessa on talvella keskimäärin muutama pakkasaste, Pohjois-Suomessa on talvella keskimäärin yli kymmenen astetta pakkasta (taulukko 1).

	Tammikuu	Helmikuu	Maaliskuu	Huhti- kuu	Toukokuu	Kesäkuu
Helsinki Kaisaniemi	-3,1	-3,8	-0,3	4,4	10,4	14,9
Jyväskylä lentoasema	-7,3	-7,6	-3,5	2,5	9,1	14,0
Rovaniemi lentoasema	-10,3	-10,3	-5,6	0,1	6,5	12,5

	Heinäkuu	Elokuu	Syyskuu	Lokakuu	Marras- kuu	Joulu- kuu
Helsinki Kaisaniemi	18,1	16,9	12,3	6,6	2,4	-0,7
Jyväskylä lentoasema	16,7	14,6	9,4	3,6	-0,9	-4,5
Rovaniemi lentoasema	15,6	13,1	7,7	0,8	-4,4	-7,7

Taulukko 1. Keskimääräiset lämpötilat Suomen kaupungeissa kuukausittain 1991–2020 celsiusasteikolla (Ilmatieteen laitos 2021).

Kylmät sääolosuhteet vaikuttavat ajoneuvojen kulutukseen Yhdysvaltain energiaministeriön (U.S. Department of Energy) (2024) mukaan seuraavasti:

- Moottorin ja vaihteiston kitka lisääntyy moottoriöljyn viskositeetin kasvaessa.
- Moottorin energiatehokkuus heikkenee moottorin käydessä alhaisessa lämpötilassa, mikä kasvattaa kulutusta erityisesti ensimmäisten kilometrien aikana.
- Talvilaatuisten polttoaineiden energiasisältö on usein kesälaatuja alhaisempi, mikä lisää kulutusta.
- Lämmitettävät istuimet, lämpövastukselliset ikkunat ja lämmityslaitteiden puhaltimet kuluttavat lisäenergiaa. Lisäksi ajoneuvon lämmittäminen ennen matkaa kuluttaa polttoainetta, vaikka ajoneuvo ei liiku.
- Kylmempi ja tiheämpi ilma lisää ilmanvastusta, erityisesti maantienopeuksilla ajettaessa.
- Renkaiden paine laskee kylmässä, mikä lisää vierintävastusta. Lisäksi lumi ja jää voivat lisätä vierintävastuksen lisäksi renkaiden sutimista, mikä johtaa energiankulutuksen kasvuun.
- Sähköisten ajoneuvojen akuston suorituskyky heikkenee kylmässä, mikä vaikeuttaa akun latausta ja heikentää sähköautojen jarrutusenergian talteenottoa.

- Haastavat keliolosuhteet voivat estää optimaaliset ajonopeudet, mikä lisää polttoaineen kulutusta.

Suomessa käytettävät korkeat painorajat yhdistettynä vaativiin talvisiin olosuhteisiin tuovat lisähaasteita raskaiden kuljetusten toteuttamiselle vaihtoehtoisten käyttövoimien avulla, sillä olosuhteet voivat vaikuttaa huomattavasti mm. ajoneuvojen toimintasäteeeseen (Pihlatie ym. 2023).

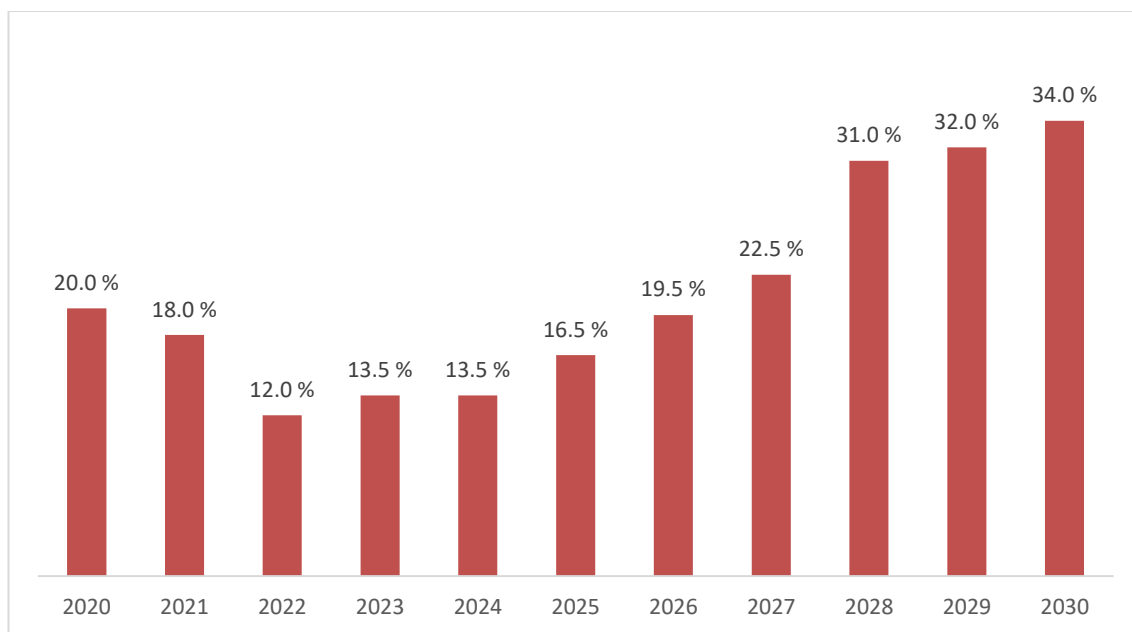
5.3 Raskaan liikenteen päästöt ja toimenpiteet päästöjen vähentämiseksi

Tieliikenteestä syntyi Suomessa vuonna 2020 noin kymmenen miljoonaa tonnia hiilidioksidipäästöjä, mikä muodosti yli viidenneksen kaikista Suomen sisäisistä päästöistä. Kuorma-autojen osuus tieliikenteen päästöistä oli noin kolmannes (Liimatainen ym. 2023). Dieselkäyttöisen puoliperävaunuyhdistelmän synnyttämät CO₂-päästöt ovat ajoneuvon elinkaaren aikana noin 1000 tonnia ja täysperävaunuyhdistelmän 1100 tonnia. Nollapäästöinen ajoneuvoyhdistelmä voi näin ollen vähentää saman verran yksittäisen ajoneuvon päästöjä (Traficom 2021a). Biometaania käyttävien ajoneuvojen elinkaaren aikaiset CO₂-päästöt ovat noin 150 tonnia puoliperävaunuyhdistelmissä ja 175 tonnia täysperävaunuyhdistelmissä, mikä merkitsee 85 prosentin vähennystä päästöihin dieselajoneuvoihin nähden (Traficom 2021b).

Suomen kansallisessa energia- ja ilmastostrategiassa tavoitteena on vähentää liikenteen hiilidioksidipäästöjä 50 prosenttia vuoteen 2030 mennessä ja saavuttaa kasvihuonekaasupäästöjen nollassa vuoteen 2045 mennessä (Liimatainen ym. 2023; SKAL 2023a). Strategiassa keskeisenä periaatteena on suunnitella ja valita mahdollisimman kustannustehokkaita toimia päästöjen vähentämiseksi (Liimatainen ym. 2023). Käyttövoimien siirtymään voidaan vaikuttaa asettamalla veroja ja muita maksuja, jotka lisäävät polttomoottoriajoneuvojen kokonaiskustannuksia tai vaihtoehtoisesti asettamalla tukia ja verohuojennuksia vähäpäästöisille ajoneuvoille ja polttoaineille. Suomessa on määritelty kaikille polttoaineille valmisteverot: kestävästi tuotetuilla ja jätteistä tuotetuilla polttoaineilla on verrokkejaan alhaisemmat verot (Verohallinto 2024). Verotus ei kuitenkaan ole kaikkien polttoaineiden osalta johdonmukaista, sillä esimerkiksi HVO-dieselin valmistevero on maa-kaasua korkeampi alhaisemmista päästöistä huolimatta. (Murto 2024).

Jakeluelvoite määrittelee, kuinka suuri osa jakelijoiden liikennekäyttöön toimitettavasta polttoaineesta tulee olla uusiutuvaa. Laki 446/2007 uusiutuvien polttoaineiden käytön

edistämisestä liikenteessä määritteli ns. jakeluelvoitteeksi 28 prosenttia vuodelle 2024 ja 29 prosenttia vuosille 2025–2026 (Sipilä & Lottonen 2024). Lakimuutosten myötä jakeluelvoitteen kasvu jäädytettiin kuitenkin ensin 13,5 prosenttiin vuoden 2024 osalta, ja vuoden 2025 jakeluelvoitetta rajattiin myöhemmin 16,5 prosenttiin. Jakeluelvoitteen on kuitenkin määrä kasvaa vuosittain siten, että vuonna 2030 jakeluelvoite olisi 34 prosenttia. (Työ- ja elinkeinoministeriö 2023b; 2024).



Kuva 11. Uusiutuvien polttoaineiden vähimmäisosuus energiasisällön kokonaismäärästä eli jakeluelvoite vuosina 2020–2030 (Työ- ja elinkeinoministeriö 2024).

Raskaaseen tieliikenteeseen kohdistuva EU:n päästökauppajärjestelmä ETS2 on määrä ottaa käyttöön asteittain vuodesta 2027 alkaen (Euroopan komissio 2024d). Päästökauppa nähdään tehokkaana tapana kohdentaa päästövähennyksiä kustannustehokkaasti, mutta sen ulottaminen raskaaseen liikenteeseen johtaa kokonaiskustannusten merkittävään nousuun. Samalla se kuitenkin parantaa tehokkuutta mm. kuormien kasvun myötä. (Liimatainen ym. 2023). EU:n laajuisen päästökauppajärjestelmän rinnalle voitaisiin tarvittaessa käyttöön Suomen kansallinen päästökauppa, jolloin liikenteen päästövähennyksissä voidaan saavuttaa kansalliset päästötavoitteet tehokkaammin (Suomen ilmastopaneeli 2022).

Kuljetusten kustannuksia lisäävät toimenpiteet, kuten polttoaineiden jakeluelvoite ja päästökaupan ulottaminen raskaisiin ajoneuvoihin, vaikuttavat ensisijaisesti polttoaineiden käytöstä syntyviin kustannuksiin. (Liimatainen ym. 2023). Kohoavien

käyttökustannusten myötä nolla- ja vähäpäästöiset ajoneuvot tulevat olemaan elinkaari-kustannuksiltaan kilpailukykyisempiä dieselajoneuvoihin verrattuna.

Suomessa siirtymää kohti päästötöntä raskasta liikennettä on edistetty myös vähäpäästöisten ajoneuvojen hankintaan kohdistettujen tukien avulla. Hankintatuki nähdään kuljetusyritysten osalta merkittävänä lisäarvona vaihtoehtoisilla käyttövoimilla toimivan kaluston hankinnalle, vaikka tuki ei ollutkaan yleensä merkittävin peruste käyttövoiman valinnalle (Viinikainen ym. 2023). Metsärannan ym. (2024) mukaan hankintatuet nopeuttavat ajoneuvokannan muutosta vähäpäästöisemmäksi ja näin vähentävät liikenteen kokonaispäästöjä. Vastaavasti Liimatainen ym. (2023) arvioivat, että sähköllä ja biometaanilla toimivien ajoneuvojen hankintatuet ovat yhteiskunnalle erittäin kustannustehokkaita tapoja liikenteen kasvihuonepäästöjen vähentämiseksi.

Lain 1289/2021 myötä tehtiin päätös vaihtoehtoisella käyttövoimalla toimivan ajoneuvon hankinnan määräaikaisesta tukemisesta 1.1.2022 alkaen. Laissa määriteltiin tuki sähkökäyttöisen kuorma-auton, sähkökäyttöisen perävaunun ja kaasutai vetykäyttöisen kuorma-auton hankintaan. Kuorma-autoille myönnetyt tuet kasvoivat portaittain ajoneuvon suurimman sallitun massan mukaisesti: sähköisille sekä vetykäyttöisille ajoneuvoille tuki oli korkeimmillaan 50 000 euroa ja nesteytettyä maakaasua käyttäville ajoneuvoille tuki oli 14 000 euroa. Hankintatuki oli voimassa 31.12.2024 asti, jonka jälkeen tukea ei ole myönnetty enää uusiin hankintoihin (Metsäranta ym. 2024). Määritetyt hankintatuet oli varattu täysimääräisesti kuitenkin jo elokuussa 2024 (Traficom 2024c).

5.4 Vaihtoehtoisten käyttövoimien saatavuus Suomessa

5.4.1 HVO-diesel

Neste on maailman tunnetuin HVO-dieselin valmistaja (Unglert ym. 2020). Suomessa uusiutuvaa dieseliä tuottaa Nesteen lisäksi UPM. Nesteen NEXBTL-tekniikalla valmistettua HVO-dieseliä valmistetaan kasviöljyistä ja jäteöljyistä. UPM puolestaan valmistaa sellun tuotannon sivutuotteena syntyvästä mäntyöljystä uusiutuvaa dieseliä, josta yritys käyttää nimeä UPM BioVerno. Nesteen uusiutuvan dieselin tuotantokapasiteetti Suomessa on noin 420 öljykvivalenttikilotonnia ja UPM:n noin 100 öljykvivalenttikilotonnia (Linjala & Kajolinna 2023). Alan vahvojen toimijoiden myötä HVO-dieseliä on Suomessa saatavissa laajalti eri toimijoiden asemilta (Neste 2024a; St1 2024).

5.4.2 Biometaani

Suomessa toimii kymmeniä biometaanin tankkausasemia, joista valtaosa on valtio-omistuksen Gasumin omistuksessa. Gasum jakelee asemilla maakaasusta puhdistetun fossiilisen metaanin sijaan ainoastaan biometaania (Gasum 2024a), minkä myötä valtaosa niin kaasun kuin nestemäisenkin metaanin käytöstä Suomessa on vähäpäästöistä. Suomi on määrätietoisesti pyrkinyt kehittämään biometaanin tuotantoa jakelunelvoitteen ja sen lisäelvoitteiden saavuttamiseksi, ja biometaania voidaankin hyödyntää Suomessa erityisesti raskaan liikenteen päästöjen vähentämiseksi (Sipilä & Lottonen 2024). Pääkkönen ym. (2019) arvioivat, että Suomessa voitaisiin tuottaa vuosittain 9,5 TWh:n edestä biometaania raskaiden ajoneuvojen käyttöenergiaksi, mikä riittäisi kattamaan Suomessa kaiken täysperävaunuyhdistelmäliikenteen.

Biometaanin jakeluinfratruktuurin tulisi käyttöelvoimaan houkuttelevuuden lisäämiseksi olla vielä nykytilannetta tiheämpää. Lisäksi biometaanin tankkausprosessi koetaan hitaana ja sen toimintavarmuus puutteellisena teknisten ongelmien vuoksi, joskin näillä osa-alueilla on tapahtunut viime vuosina myös kehitystä. (Viinikainen ym. 2023).

Käyttöelvoimien murros vaikuttaa kokonaisuudessaan merkittävästi myös kansalliseen maatalouteen ja jätehuoltoon, sillä vaihtoehtoisissa käyttöelvoimissa käytetään pääosin kotimaassa tuotettua sähköä ja biopolttoaineita, kun taas fossiilisissa polttoaineissa nojataan voimakkaasti tuontiin (Liimatainen ym. 2023).

5.4.3 Sähkö

Suomessa uusiutuvan energian osuus energian kokonaistuotannosta on muiden Pohjoismaiden tapaan korkea (Proskurina & Mendoza-Martinez 2023). Vuonna 2023 69 prosenttia Suomen energiankulutuksesta koostui päästöttömästä energiasta. Tästä 42 prosenttia koostui uusiutuvasta energiasta ja 27 prosenttia ydinvoimasta. Fossiilisten polttoaineiden ja turpeen osuus oli 30 prosenttia (Tilastokeskus 2024a). Suomi pyrkii jatkossa edelleen kasvattamaan päästöttömän sähkön tuotantoa (Valtioneuvosto 2023). Energiasektorin hiilidioksidipäästöjen vähentäminen on edellytys sähköisen liikenteen päästöttömyydelle (Siskos ym. 2018).

Raskaan liikenteen sähköistäminen edellyttäisi sekä sähköntuotannon lisäämistä että laatusinfratruktuurin kehittämistä. Suomen kuorma-autoliikenteen sähköistäminen lisäisi

sähkön kulutusta Suomessa arvioilta 15 prosenttia eli Olkiluoto 3:n tuotantokapasiteetin verran (SKAL 2023a). Samalla Suomesta puuttuu käytännössä kokonaan julkinen latausverkosto raskaalle liikenteelle. Tämän myötä yritykset ovat riippuvaisia omasta latausinfrastruktuuristaan, mikä johtaa merkittäviin investointikustannuksiin sähköisiin ajoneuvoihin siirryttäessä. Korkeatehoinen julkinen latausinfrastruktuuri nähdäänkin erityisen tärkeänä sähköisten kuorma-autojen käytettävyyden kannalta. Julkisen latausinfrastruktuurin vähäisyys tuo kuljetuksiin piilokustannuksia, mikäli tankkaus- tai latausaseman saavuttaminen edellyttää ylimääräisiä ajokilometrejä. BEV-ajoneuvojen liikennöinnin edellytyksenä voi tällöin olla reittien suunnittelu ja aikataulujen mukauttaminen käyttövoimalle sopivaksi. (Viinikainen ym. 2023).

5.4.4 Vety

Puhtaan vedyn tuotanto perustuu vedyn elektrolyysiin, jolloin päästöttömän sähkön tuotannon kasvu on myös edellytyksenä vetytalouden saavuttamiselle. Tällä hetkellä Suomessa tuotetaan vetyä noin 150 000 tonnia vuodessa, ja noin 99 prosenttia siitä tuotetaan maakaasusta. Kaikesta tuotetusta vedystä 88 prosenttia vedystä käytetään öljyn ja biopolttoaineiden kuten HVO-dieselin jalostuksessa Nesteen ja UPM:n tuotantolaitoksissa. (Valtioneuvosto 2023).

Hallituksen vuonna 2022 laatimassa ilmasto- ja energiastrategiassa mainitaan Suomen tavoitteeksi luoda edellytykset toimia johtavassa asemassa Euroopan vetytaloudessa, jonka myötä Suomi voisi tuottaa yli kymmenen prosenttia kaikesta Euroopassa tuotettavasta vedystä (Valtioneuvosto 2023). Valtioneuvoston (2023) mukaan Suomen vahvuuksia vetytaloudessa ovat muun muassa riittävä edullinen uusiutuva energia, vakaa sähköverkko, korkean tason teollinen ja energia-alan osaaminen, biopohjaiset hiilidioksidin lähteet sekä puhtaan veden tarjonta.

Vuoden 2023 alussa Suomessa oli eri vaiheissa yli 20 vedyn tuotantoon liittyvää hanketta mm. liikenteen päästöjen vähentämiseksi. Energiavirasto on myöntänyt tukia vedyn investoinneille, joiden tavoitteena on kehittää vedyn jakeluun perustuvaa asemaverkostoa vedyn hyödyntämiseksi raskaassa liikenteessä. (Valtioneuvosto 2023). Hiilineutraalin vedyn ja vedystä johdettavien e-polttoaineiden valmistamiseen tähtäävät hankkeet tuottaisivat toteutuessaan monin kerroin suurempia määriä vetyperusteisia polttoaineita kuin niiden kulutuksen arvioidaan olevan (Sipilä & Lottonen 2024).

Suomen ensimmäisen vetytankkausaseman on määrä aueta Jyväskylään vuoden 2025 aikana, jolloin otetaan myös käyttöön viisi paikallisliikenteessä kulkevaa vetykäyttöistä linja-autoa. Aseman on tarkoitus palvella myös raskasta liikennettä. (Jyväskylän elinkeinopalvelut 2024).

6 Kustannuslaskenta

6.1 Ajoneuvotyypit

Tutkielmassa käytetyt ajoneuvotyypit ja niiden painorakenteet perustuvat ensisijaisesti eri käyttäjäosapuolten ja Traficomien yhteisesti sovittuihin luokituksiin, joita käytetään yleisesti mm. Traficomien ja Tilastokeskuksen julkaisuissa ja raporteissa (Tilastokeskus 2022). Jotta tutkimus olisi vertailukelpoinen Euroopassa käytössä olevan ajoneuvokannan kanssa, puoliperävaunuyhdistelmän kokonaismassaksi on määritelty 42 tonnia, kun edellä mainitussa luokittelussa puoliperävaunuyhdistelmän massana käytetään 48 tonnia. Täysperävaunuyhdistelmän kokonaismassaksi on määritelty 64 tonnia ja HCT-ajoneuvoyhdistelmän kokonaismassaksi 76 tonnia luokituksen mukaisesti.

Tutkielmassa käytettävät ajoneuvotyyppien suoritekilometrit pohjautuvat Tilastokeskuksen käyttämiin vuosittaisiin ajosuoritteisiin, jotka ovat puoliperävaunuyhdistelmille 100 000 kilometriä vuodessa, täysperävaunuyhdistelmille 125 000 kilometriä ja HCT-ajoneuvoyhdistelmille 170 000 (Tilastokeskus 2022). Ajopäivien vuosittaiseksi määräksi tutkielmassa on arvioitu 21,5:n kuukausittaisen arkipäivän mukaisesti 258 ajopäivää vuodessa, jolloin päivittäiset ajoneuvotyyppien ajamat matkat jakautuvat taulukon 2 mukaisesti. Taulukossa on lisäksi määritelty ajoneuvotyyppien suoritteet erikseen talvikuukausille joulukuusta helmikuuhun, sillä ajoneuvojen lisääntynyt kulutus talvikuukausina on otettu huomioon ajoneuvojen polttoainekustannuksia tarkastellessa.

Ajoneuvotyyppi	Puoliperävaunuyhdistelmä	Täysperävaunuyhdistelmä	HCT-yhdistelmä
Ajoneuvon kokonaismassa	48 t	64 t	76 t
Kilometrit vuodessa	100000	125000	170000
Kilometrit kesäkaudella	75000	93750	127500
Kilometrit talvikaudella	25000	31250	42500
Kilometrit päivässä	388	484	659

Taulukko 2. Ajoneuvotyypit ja -suoritteet.

6.2 Ajoneuvokustannukset

Tutkielmassa käytetään hankintahintojen osalta Liimataisen ym. (2023) arviota ajoneuvojen hankintahinnoille puoli- ja täysperävaunuyhdistelmille. Kaasukuorma-autojen hintakerroin on 1,3, sähkökuorma-autojen 2,5 ja vetykuorma-autojen 4,0 dieselajoneuvoihin

verrattuna. Käytetyssä lähteessä ei ole määritelty erikseen HCT-yhdistelmien hankintakustannuksia. Tässä tutkimuksessa HCT-yhdistelmien kustannusten arvioitu olevan 10 prosenttia täysperävaunuyhdistelmän verrokkikustannuksia korkeammat.

Ajoneuvotyyppi	Puoliperävaunu-yhdistelmä	Täysperävaunu-yhdistelmä	HCT-yhdistelmä
Diesel	165 000 €	200 000 €	220 000 €
HVO-diesel	165 000 €	200 000 €	220 000 €
Biometaani	214 500 €	260 000 €	286 000 €
Sähkö	412 500 €	500 000 €	550 000 €
Polttokenno	660 000 €	800 000 €	880 000 €

Taulukko 3. Eri ajoneuvotyyppien ja käyttövoimien hankintakustannukset (Liimatainen ym. 2023 ja oma arvio).

Muiden kuin dieselnäyttöisten ajoneuvojen kustannukset ovat korkeammat osittain niiden alhaisempien tuotantomäärien takia, jolloin niiden yksikköhinnat nousevat korkeammaksi (Transport & Environment 2021b). Sähköisten ajoneuvojen korkeampi hinta selittyy pääasiassa akustosta syntyvillä kustannuksilla (Peters ym. 2021), ja akkukapasiteetin kasvaessa myös ajoneuvon hintataso kasvaa merkittävästi (Basma ym. 2021a). Vetyajoneuvojen korkeammat kustannukset selittyvät enimmäkseen teknologian keskeneräisyydellä ja ajoneuvojen alhaisilla tuotantomäärillä (Shahzad & Cheema 2024). Erityisesti jälkimmäisten ajoneuvojen korkeat hankintakustannukset voivat osoittautua ylivoimaisiksi sellaisille kuljetusyrityksille, joiden varallisuustilanne on heikko. Kuitenkin myös vakavaraisten yritysten investoinnit pääomakustannuksia edellyttäviin ajoneuvoihin voivat heikentää yritysten taloudellista tilaa, ja heikentyvän luottokelpoisuuden myötä näiden yritysten rahoituskustannukset voivat nousta suunniteltua enemmän. (Parviziomran ym. 2024).

Kustannustekijöiden ohella elinkaarikustannusten tarkastelussa tulee myös huomioida tarkasteltavan ajan pituus (Alonso-Villar ym. 2022). Ajoneuvon käyttöikäksi on tutkimuksessa määritelty 10 vuotta, joka vastaa mm. Parviziomran ja Bergqvistin (2023) käyttämää käyttöikää raskaille ajoneuvoille. Ajoneuvojen ja niissä käytettävän teknologian oletetaan pysyvän käyttökelpoisena kymmenen vuoden ajan, ja esim. sähköisten ajoneuvojen akuston oletetaan säilyvän käyttökunnossa koko ajanjakson ajan.

Vähäpäästöisten raskaiden ajoneuvojen hankintaa tuettiin 31.12.2024 asti voimassa olleella hankintatuella, jonka jälkeen tukea ei vuoden 2025 alusta myönnetty enää uusiin

hankintoihin (Metsäranta ym. 2024). Tästä syystä vähäpäästöisille ajoneuvoille ei tutkielmassa ole arvioitu hankintatukia.

6.2.1 Rahoituskulut

Kolmen kuukauden euriborkorko oli Suomen Pankin (2025) mukaan 2,736 prosenttia vuoden 2025 alussa. Korkotasot ovat viimeisten vuosien aikana olleet edellistä vuosikymmentä korkeammat mutta pitkän aikavälin korkotasoa alhaisemmat. Korkotason nousu kasvattaa yritysten kynnystä ottaa velkaa investointeja varten, ja muutokset korkotasossa vaikuttavat erityisesti yritysten mahdollisuuksiin investoida velaksi hankintahinnaltaan korkeisiin ajoneuvoihin, kuten sähköisiin vaihtoehtoihin (Viinikainen ym. 2023).

Tutkielmassa korko- ja rahoituskulujen muodostaman nimelliskoron arvioidaan olevan vuosittain kokonaisuudessaan 5,0 prosenttia, josta inflaation osuus on 2,0 prosenttia. Reaalikorkokannaksi muodostuu ajoneuvoille tällöin 2,942 prosenttia. Ajoneuvojen lainat maksetaan mallissa tasaerä- eli annuiteettilyhennyksinä 10 vuoden aikana. Ajoneuvon vuotuinen lainaerä on tällöin

$$C_v = V \cdot \frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1}$$

missä

- C_v = ajoneuvon vuosittainen kustannus
- V = ajoneuvon hankintahinta
- r = reaali vuosikorko
- n = maksuaika vuosina.

6.2.2 Poistot

Poistot vaikuttavat ajoneuvon jäännösarvoon. Tilastokeskuksen (2022) julkaiseman kuorma-autoliikenteen kustannusindeksin mukaan pääoman poistojen arvioitiin vuonna 2020 kattavan 12,5–14,4 prosenttia ajoneuvoyhdistelmien kokonaiskustannuksista. Ajoneuvosta tehtävien poistojen osuus kokonaiskustannuksista vaihtelee kuitenkin merkittävästi eri käyttövoimien välillä, sillä sähkökäyttöisillä raskailla kuorma-autoilla poistojen

osuus kokonaiskustannuksista voi olla kaksinkertainen dieselkäyttöisiin verrattuna (Noll ym. 2022).

Tässä tutkielmassa ajoneuvon arvoon kohdistuvien vuosittaisten poistojen arvioidaan Laitilan ym. (2016) mukaisesti olevan 20 prosenttia. Jäännösarvo vuoden n lopussa muodostuu kaavalla

$$V_n = V \cdot (1 - p)^n$$

missä

- V_n = ajoneuvon arvo vuoden n lopussa
- V = alkuperäinen hankintahinta
- p = vuosittainen poisto
- n = omistusvuosien määrä.

Ajoneuvon jäännösarvoksi muodostuu näin 20 prosentin poistoilla 10 vuoden käytön jälkeen noin 10,7 prosenttia ajoneuvon hankinta-arvosta.

6.3 Polttoainekustannukset

Ajoneuvojen kustannuslaskennassa tulee huomioida ajoneuvon hankintahinnan lisäksi käytöstä syntyvät kustannukset, kuten polttoaine- ja huoltokustannukset (Zhang ym. 2022). Kuorma-autoliikenteen kustannusindeksissä (2022) polttoainekulujen osuus kokonaiskustannuksista on ajoneuvoyhdistelmissä 20,4–25,2 prosenttia.

Tässä tutkielmassa ajoneuvojen kulutus on laskettu kaavalla

$$C_f = \left(\frac{F_w}{100} \times L_w + \frac{F_s}{100} \times L_s \right) \times P_f$$

missä

- C_f = vuotuinen polttoainekustannus (€)
- F_w = ajoneuvon polttoaineenkulutus talvikuukausina (per 100 km)
- F_s = ajoneuvon polttoaineenkulutus muina kuukausina (per 100 km)

- L_w = ajosuorite talvikuukausina (km)
- L_s = ajosuorite muina kuukausina (km)
- P_f = polttoaineen hinta (€/litra, €/kg tai €/kWh).

Ajoneuvotyyppien vuotuisiksi ajosuoritteiksi on taulukon 2 mukaisesti määritetty 100 000 km puoliperävaunuyhdistelmille, 125 000 km täysperävaunuyhdistelmille ja 170 000 km HCT-yhdistelmille. Näistä kilometrilukemista neljäsosa kohdistuu talvikuukausille, jotka tutkimuksessa ovat joului-, tammi- ja helmikuu. Ajoneuvojen polttoaineen kulutus on arvioitu VECTO-simuloinnilla ajoneuvotyyppi- ja käyttövoimakohtaisesti sekä kesä- että talviolosuhteissa diesel-, biometaan- sekä sähköajoneuvoille. HVO-diesel- ja vetyajoneuvojen kulutukset on johdettu diesel- ja sähköajoneuvoista ottamalla huomioon polttoaineiden energiasisältö Euroopan uusiutuvan energian direktiivin (RED III, 2023/2413) mukaisesti (taulukko 4).

Energiasisältö	MJ/kg	MJ/l
Diesel	43	36
Vetykäsittelty diesel	44	34
Biometaan	50	
Vety	120	

Taulukko 4. Polttoaineiden energiasisällöt

Dieselin hinta on Suomessa vaihdellut viime vuosina merkittävästi erityisesti Venäjän Ukrainaan kohdistuvan hyökkäyssodan myötä. Tässä tutkielmassa dieselin pohjahinta on määritetty Tilastokeskuksen tietokannan pohjalta, ja hinnaksi on määritelty veroton keskihinta tammikuun 2021 ja heinäkuun 2024 välisen ajanjakson kuukausittaisista kuluttajahinnoista, jolloin dieselin litrahinnaksi muodostuu 1,516 euroa (Tilastokeskus 2024b). Sipilän ja Lottosen (2024) selvityksen mukaan prosentin kasvu jakeluelvoitteessa kasvattaa hintaa noin sentin litraa kohti. Koska jakeluelvoite nousee vuonna 2025 kolmella prosenttiyksiköllä vuoden 2024 tasosta (Työ- ja elinkeinoministeriö 2024), arvioidaan dieselin verottomaksi litrahinnaksi 1,546 euroa. Mahdollisten myöhemmin toteutettavien jakeluelvoitteiden noston vaikutuksia ei arvioida tämän tutkimuksen yhteydessä.

HVO-dieselin hinta on Suomessa seurannut dieselin hintaa, mutta sen hinta on sisältänyt premion dieseliin verrattuna. HVO-dieselin keskiarvolitrahinta oli vuonna 2023 tehdyllä seurantajaksoilla Suomen jakeluasemilla keskimäärin 0,25 euroa kalliimpaa kuin dieselin

(Klemola 2023). Tällöin HVO-dieselin arvonlisäveroton litrahinta on 0,202 euroa dieseliä korkeampi, jonka myötä HVO-dieselin hinnaksi on arvioitu 1,748 euroa litralta.

Suomen merkittävin biometaanin jakelija Gasum on luopunut kokonaan fossiilisesta maa-kaasusta tuotetun metaanin jakelusta liikenneasemillaan (Gasum 2024a). Biometaanin hinnaksi on määritelty Gasumin verkkosivuilla vuoden 2025 alussa ollut 1,94 euroa kiloa kohden, jolloin arvonlisäveroton hinta on 1,516 euroa/kg. Biometaanin hinta kilogrammaa kohden on täten identtinen dieselille määritellyn litrahinnan kanssa. Biometaanin tuotannosta maksetaan polttoaineveron sijaan sähköveroa energiasisällön mukaisesti 10,414 euroa/MWh (Verohallinto 2023). Biometaanin energiasisällön ollessa RED III:n mukaisesti 50 MJ/kg muodostuu veron osuudeksi 0,145 euroa/kg.

Sähköisissä ajoneuvoissa lataukseen käytettävä aika on käänteisesti verrannollinen latauksessa tarvittavaan tehoon: siinä missä 45 minuutin lepotauko edellyttää lähes megawatin lataustehoa akun lataamiseksi täyteen, 13 tunnin yölepojaksolle riittää 50 kW latausteho (Mareev ym. 2018). Latauksessa käytettävä teho voi vaikuttaa huomattavasti latauskustannuksiin, sillä 350–1000 kWh suurteholatausinfrastruktuurin rakentaminen on monin kerroin kalliimpaa kuin alle 100 kWh:n asemien (Bergqvist ym. 2023). Alhaisempien kustannusten myötä yritysten on järkevää hyödyntää mahdollisuuksien mukaan alhaisilla tehoilla käytettävää infrastruktuuria (Mareev ym. 2018). Tässä tutkielmassa yritysten oletetaan käyttävän hidasta latausta yöllä ja lataavan akkua käytön edellyttämän määrä päivisin suurteholatureiden avulla.

Sähkön hinta vaihtelee merkittävästi enemmän kuin polttoaineiden hinnat, mikä tekee kustannusten arvioinnista haastavaa. Sähkön arvonlisäveroton hinta on ollut vuosien 2022–2024 aikana keskimäärin 9,43 senttiä/kWh (Tilastokeskus 2024c), jonka lisäksi sähkön kokonaishintaan on laskettu mukaan sähkönsiirron kustannuksiksi 3,00 senttiä/kWh. Latausasemien infrastruktuurikustannuksiksi on arvioitu Teichertin ym. (2023) mukaisesti hitaalle lataukselle 3,77 senttiä/kWh ja pikalataukselle 15,77 senttiä/kWh, jolloin pikalatauksen hinta on 12 senttiä hidasta latausta kalliimpaa. Hitaan latauksen kokonaishinnaksi on tutkimuksessa näin arvioitu 16,2 senttiä/kWh ja nopean lataukselle hinnaksi 28,2 senttiä/kWh.

Uusiutuviin energianlähteisiin pohjautuvan vedyn ja siitä johdettavien e-polttoaineiden tuotantomäärät ovat edelleen niin vähäisiä, että markkinahintojen arviointi on haasteellista (Sipilä & Lottonen 2024). Arviot elektrolyysillä tuotetun vihreän vedyn

kustannuksista vaihtelevatkin merkittävästi eri lähteiden välillä, ja arviot hinnasta ovat noin 3–17 euron välillä kiloa kohden (UNECE 2021; Rout ym. 2022).

Saksassa vihreän vedyn hinta jakeluasemilla on noin 9,5–11 euroa/kg fossiilisen vedyn hinnan ollessa noin 12,85–15,25 euroa/kg (H2 Mobility 2023). Tutkielmassa käytettävä vihreän vedyn hinta kiloa kohti pohjautuuakin Saksassa käytettävään nykyiseen hintatasoon, jonka myötä pohjahinnaksi hinnaksi on määritelty 8,19 euroa/kg, joka on arvonlisäveroprosentilla (16 prosenttia) vähennetty vedyn hinta Saksassa. Saksassa polttokennoajoneuvoihin myytävä vety on vapautettu valmisteverosta (Nationaler Wasserstoffrat 2024). Suomessa on sen sijaan määritelty, että liikennepolttoaineina käytettävien energiälähteiden pitää maksaa vastaavan korvattavan polttoaineen mukainen valmistevero ja huoltovarmuusmaksu (Verohallinto 2024). Koska polttokennoajoneuvoissa käytetään sähkömoottoreita, nähdään käytettävän vedyn korvaavan tällöin sähköä. Vedyn valmisteveron osuus olisi tällöin 0,751 euroa/kg vedyn energiansisällön ollessa 120 MJ/kg ja sähkön valmisteveron ollessa 2,253 euroa/kWh. Tämän myötä tutkielmassa käytettäväksi vedyn hinnaksi muodostuu 8,941 euroa/kWh.

Käyttövoima		Valmistevero	Hinta (alv 0 %)	Hinta (alv 25,5 %)
Diesel	l	0,547	1,546	1,940
HVO-diesel	l	0,320	1,748	2,194
Biometaani	kg	0,145	1,546	1,940
Sähkö (hidas lataus)	kWh	0,023	0,1620	0,2033
Sähkö (pikalataus)	kWh	0,023	0,2820	0,3539
Polttokenno	kg	0,751	8,941	11,221

Taulukko 5. Käyttövoimien energiälähteiden hinnat ja verojen osuus euroina.

6.4 Muut kustannukset

Tutkielmassa tarkasteltavat muut kustannukset koostuvat huolto- ja vakuutuskustannuksista. Tutkielmassa käytetään sovellettuna Liimataisen ym. (2023) arvioimia huoltokustannuksia, jotka on laskettu kilometreittäin eri käyttövoimien ja kuorma-autotyyppien mukaisesti. Ajoneuvotyypeittäin taulukossa 6 määritetyt huoltokustannukset sisältävät myös korjaus- ja rengaskustannukset. Liimataisen ym. (2023) alkuperäiset arviot eivät sisällä HCT-ajoneuvojen tai polttokennoajoneuvojen huoltoon liittyviä kustannuksia. Koska HCT-kuljetukset kasvattavat ajoneuvojen kuormitusta ja renkaiden kulutusta, arvioidaan HCT-kuljetusten lisäävän huoltokustannuksia 10 prosenttia

täysperävaunuyhdistelmään verrattuna. Vetykäyttöisten ajoneuvojen kustannusten puolestaan oletetaan olevan samalla tasolla sähkökäyttöisten ajoneuvojen kanssa.

Ajoneuvotyyppi	Puoliperävaunu-yhdistelmä	Täysperävaunu-yhdistelmä	HCT-yhdistelmä
Diesel	0,163 €/km	0,220 €/km	0,242 €/km
HVO-diesel	0,163 €/km	0,220 €/km	0,242 €/km
Biometaan	0,158 €/km	0,220 €/km	0,242 €/km
Sähkö	0,133 €/km	0,190 €/km	0,209 €/km
Polttokenno	0,133 €/km	0,190 €/km	0,209 €/km

Taulukko 6. Eri ajoneuvotyyppien ja käyttövoimien huolto- ja rengaskustannukset (Liimatainen ym. 2023 ja omat arviot).

Monet kehittyviin teknologioihin vaikuttavat kustannukset voivat olla vaikeasti arvioitavissa, sillä esimerkiksi huoltoihin ja ylläpitoon saattaa sisältyä kustannusriskejä, jotka ovat vaikeammin arvioitavissa kuin perinteisissä polttomoottoriajoneuvoissa. Mikäli uuden teknologian ajoneuvossa on enemmän käyttöön vaikuttavia vikoja, voi menetetyillä kuljetuskilometreillä olla huomattava taloudellinen vaikutus (Takman & Andersson-Sköld 2021). Käytettävään pääomaan sekä teknologian luotettavuuteen ja kestävyyskustannuksiin kohdistuvat epävarmuustekijät voivat rajoittaa erityisesti pieniä kuljetusyrityksiä tekemästä investointeja vaihtoehtoihin käyttövoimiin. (Siskos & Moysoglou 2019).

Vakuutuskustannusten arvioidaan olevan vuodessa 5500 euroa, mikä vastaa Rialin ja Pérezin (2021) arviota vakuutuksen kustannustasosta. Tilastokeskuksen kuorma-autoliikenteen kustannusindeksi (2024d) mukaan vakuutusten osuus HCT-yhdistelmillä on 4,2 prosenttia kokonaiskustannuksista. Alhaisempien suoritteiden myötä puoliperävaunuyhdistelmillä vakuutusmaksujen osuus nousee 5,7 prosenttiin.

Ajoneuvojen vuosittaiset huoltokustannukset ja vakuutuskustannukset ovat tällöin:

$$C_0 = (c_m \times L) + c_i$$

missä

- C_0 = vuotuiset huolto- ja vakuutuskustannukset
- c_m = ajoneuvon huoltokustannus (per km)
- L = vuotuinen ajosuorite (km)

- c_i = vakuutuskustannukset

6.5 Elinkaarikustannukset

Ajoneuvojen koko elinkaaren huomioivassa kustannuslaskennassa on sovellettu Zhangin ym. (2022) ja Alonso-Villarin ym. (2022) käyttämää nettonykyarvoon perustuvaa elinkaarikustannusmallia (TCO, total cost of ownership). Elinkaarikustannusmalli ottaa huomioon diskonttauksen myötä kustannusten reaalisen nykyarvon.

Ajoneuvon kokonaiskustannukset muodostuvat tässä tutkimuksessa kaavasta

$$TCO = \sum_{t=1}^n \frac{C_t}{(1+i)^t} - \frac{V_n}{(1+i)^n}$$

missä

- C_t = vuoden t kokonaiskustannus
- V_n = ajoneuvon jäännösarvo
- i = reaalikorko.

Vuosittainen kokonaiskustannus on

$$C_t = C_v + C_f + C_o$$

missä

- C_v = vuotuinen ajoneuvokustannus
- C_f = vuotuinen polttoainekustannus
- C_o = vuotuiset huolto- ja vakuutuskustannukset

7 Polttoaineen kulutuksen simulointi VECTO-työkalulla

VECTO on Euroopan komission kehittämä simulaatiotyökalu raskaiden hyötyajoneuvojen polttoaineenkulutuksen ja hiilidioksidipäästöjen määrittelyä varten. VECTO:n avulla voidaan simuloida ajoneuvon energiankulutusta erilaisten ajoprofiilien perusteella. Simulaatioiden laskenta perustuu ajoneuvokohtaisiin parametreihin, kuten ajoneuvon massaan, käyttövoimaan, vierintä- ja ilmanvastukseen, vaihteiston kitkaan, apulaitteiden tehontarpeeseen sekä moottorin suorituskykyyn. Ajoneuvovalmistajien tulee raportoida ja julkaista VECTO:n avulla lasketut tiedot päästöistä ja polttoaineen kulutuksesta. (Euroopan komissio 2024a). Työkalu on vapaasti ladattavissa Euroopan komission sivuilta. VECTO sisältää valmiita malleja erilaisille ajoneuvoille ja käyttövoimille, ja oletusarvoja voi halutessaan tarkentaa käyttötarpeiden mukaan.

Tässä tutkimuksessa VECTOlla on simuloitu ajoneuvojen polttoaineenkulutusta eri käyttövoimilla ja ajoneuvotyypeillä maantieliikenteessä osana kustannuslaskentaa ja käyttöpotentiaalin arviointia. Koska mm. ilmanvastuksen ja vierintävastuksen kasvu voi kasvattaa ajoneuvon kulutusta talvella merkittävästi kesään verrattuna (Rahkola 2019), tutkimuksessa on määritelty ilmanvastukset ja renkaiden vierintävastukset erikseen talvi- ja kesäkausille, ja kaikille tutkimuksessa verrattaville ajoneuvotyypeille on tehty simulaatiot kummallakin vuodenaikalla. Ajoneuvon voimansiirtoon, kuten moottoreihin, vaihdelaatikoihin ja apulaitteisiin liittyvissä asetuksissa on käytetty VECTO-työkalun valmiita malleja ja niiden oletusparametreja.

7.1 Ilmanvastus ja vierintävastus

Ilmanvastusarvo kuvaa ajoneuvon poikkipinta-alan ja sen muotokertoimen tuloa $CD \times A$ (Rahkola 2019). Ajoneuvojen aerodynamiikkaa parantamalla muotokerrointa saadaan pienemmäksi, jolloin ilmanvastusarvo pienenee (Hariram ym. 2019). Tutkimuksessa ajoneuvojen ilmanvastuksena on käytetty Euroopan unionin asetuksessa (EU) 2017/2400 (Euroopan parlamentti ja Euroopan unionin neuvosto 2017) ajoneuvoryhmälle 9 määriteltyä kiinteää ilmanvastusarvoa 8,5. Ajoneuvon korkeudeksi ajoneuvoille on määritelty 3,9 metriä.

Ilman tiheys kasvaa ulkolämpötilan laskiessa, mikä kasvattaa ajoneuvojen kulutusta talvella. Tiheyden kasvu on otettu huomioon tehdyissä simulaatioissa. Kesäkauden simulaatioissa käytetään ilman tiheytenä $1,225 \text{ kg/m}^3$, joka vastaa tiheyttä 15 celsiusasteen

lämpötilassa (Ilmatieteen laitos 2025b). Talvikuukausille joulukuusta helmikuulle tiheydeksi on määritelty $1,326 \text{ kg/m}^3$, joka on ilman tiheys -7 celsiusasteen lämpötilassa (TLK Energy 2025).

VECTO Conventional Vehicle

Tractor [t]
 Technically Permissible Maximum Laden Mass
 HDV Group

General Powertrain Torque Limits ADAS PTO

Masses / Loading
 Corrected Actual Curb Mass Vehicle [kg]
 Curb Mass Extra Trailer/Body [kg]
 Loading [kg]

Air Resistance
 Cd x A [m²]
 Max. Vehicle Height [m]

Cross Wind Correction
 Speed dependent (Declaration Mode)

Dynamic Tyre Radius
 Radius [mm]

./Class9_RigidTruck_6x2_Roadsweeper -- (MISSING!)

Axles / Wheels

#	Rel. load	Twin T.	RRC	Fz ISO	Wheels	Inertia	Axle Type
1	0.166	no	0.009	20850	315/80 R22.5	14.9	Vehicle non-driven
2	0.167	yes	0.009	20850	315/80 R22.5	14.9	Vehicle driven
3	0.167	yes	0.009	20850	315/80 R22.5	14.9	Vehicle non-driven
4	0.167	no	0.009	16680	385/65 R22.5	19.2	Trailer
5	0.167	no	0.009	16680	385/65 R22.5	19.2	Trailer
6	0.166	no	0.009	16680	385/65 R22.5	19.2	Trailer

(Double-Click to Edit)

Kuva 12. Talviolosuhteissa ajettavan 42 tonnin biometaanikäyttöisen puoliperävaunuyhdistelmän määrittämiset VECTO-ohjelmassa.

Vierintävastus vaikuttaa ilmanvastuksen ohella merkittävästi ajoneuvon kulutukseen, sillä ajoneuvoon vaikuttavat voimat välittyvät renkaiden ja tien kontaktissa. Renkaat on suunniteltu muovautumaan tien pintaa vasten, jolloin ne tarjoavat pitoa ja vaimentavat tien epätasaisuudesta aiheutuvaa tärinää. Samalla renkaiden ominaisuudet aiheuttavat energiahäviötä vierintävastuksen muodossa, jolloin osa liike-energiasta häviää lämpönä. (Lundberg 2014). Renkaiden vierintävastuksen suuruuteen vaikuttaa Rahkolan (2019) mukaan renkaan rakenne, rengaspaine, kuormituksen määrä, lämpötila, ajo-olosuhteet, tienpinnan ominaisuudet ja ajonopeus.

Ajoneuvon kokoonpano määrittää kuorma-auton pyörien kokonaismäärän ja sen, kuinka moni niistä on vetäviä, jolloin esimerkiksi 6x2-ajoneuvossa kuudesta pyörästä kaksi on vetäviä (Siskos & Moysoglou 2019). Tässä tutkielmassa kaikkien yhdistelmien kokoonpanoksi on määritelty 6x2, joista ajoneuvon takarenkaat ovat parirenkaita. Simulaatioissa puoliperävaunuyhdistelmien kokonaisakselimäärä on kuusi: sekä ajoneuvolla että perävaunulla on kolme akselia. Täysperävaunu- ja HCT-yhdistelmien simuloinneissa ajoneuvoyhdistelmille on määritelty kahdeksan akselia, jolloin perävaunussa on yhteensä viisi akselia. HCT-yhdistelmissä akselimäärät ovat todellisuudessa usein tätä suurempia, mutta VECTO-ohjelman ei mahdollista kahdeksaa suuremman akselin määrittelyä. Simulaatioissa ajoneuvoyhdistelmien massan oletetaan jakautuvan tasaisesti kaikille akseleille.

Lumi ja jää voivat kasvattaa merkittävästi renkaiden vierintävastusta. Vierintävastuskerroin voi soratiellä tai lumisella tiellä kasvaa jopa tasolle 0,014, mikä merkitsee 76 tonnin ajoneuvolle liki 40 prosenttia kuivaa asfalttia korkeampaa kulutusta (Rahkola 2019). Vierintävastus kasvaa kylmillä keleillä myös laskevan rengaspaineen myötä. Lumi ja jää voivat lisäksi lisätä vierintävastuksen ohella renkaiden sutimista, mikä johtaa energiankulutuksen kasvuun. (U.S. Department of Energy 2024). Renkaiden lämpötilalla voi olla huomattava merkitys vierintävastukseen. Koska renkaiden lämpötila nousee ajonopeuden ja ajomatkan kasvaessa, vierintävastus ja samalla polttoaineen kulutus erityisesti kylmillä ajokeleillä pienenevät ajoajan kasvaessa (Hyttinen ym. 2022).

Massa	42 t	42 t	64 t	64 t	76 t	76 t
Vuodenaika	Kesä	Talvi	Kesä	Talvi	Kesä	Talvi
Vetotapa	6x2	6x2	6x2	6x2	6x2	6x2
Akselit yht.	6	6	8	8	8	8
Vierintävastus	0,006	0,009	0,006	0,009	0,006	0,009
Ilmanvastus (CD x A)	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5
Ilman tiheys (kg/m ³)	1,225	1,326	1,225	1,326	1,225	1,326

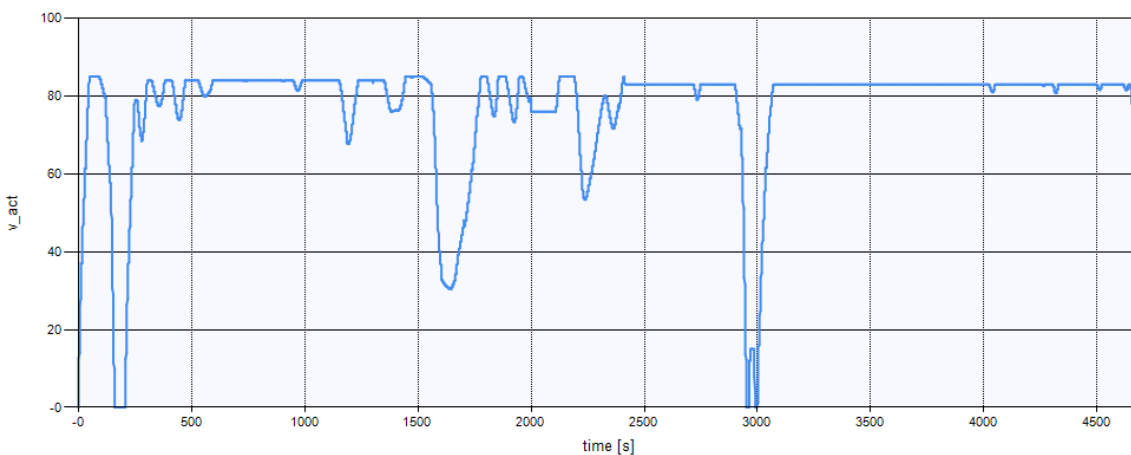
Taulukko 7. Yhteenveto simulaatioissa käytetyistä arvoista ajoneuvotyypeittäin.

Simulaatiossa ajoneuvon renkaiden kooksi on määritelty 315/80R22.5 ja perävaunun 385/65R22.5. Ajoneuvon renkaiden hitausmomentiksi on määritelty 14.9 kgm² ja perävaunun 19.2 kgm² (Lundberg 2014) mukaisesti. Renkaiden vierintävastukseksi on määritelty peruskaudella 0,006 ja talviaikana 0,009. Peruskauden vierintävastus vastaa Rahkolan (2019) käyttämää vertailuarvoa keskimääräisellä hyväkuntoisella asfalttitiellä. Vaikka lumisella tiellä vierintävastuksen kerroin voi nousta merkittävästi talvelle

määriteltyä arvoa korkeammaksi, erityisesti maanteiden ajourat pidetään talvisin pääosin paljaana lumesta suolauksen ja aurauksen avulla (ELY-keskus 2025). Arvio talviajan vierintävastuksesta vastanneekin täten keskimääräistä joului-helmikuun ajokeliä Suomessa.

7.2 Ajoprofiili

Ajoneuvojen simuloinnissa on käytetty pääosin maantienopeuksista koostuvaa, 100 kilometrin ajomatkaa kuvaavaa LongHaul-ajoprofiilia (kuva 12). Ajoneuvojen maksiminopeus on määritetty mallissa 85 kilometriin tunnissa. Tehdyissä simulaatioissa ajoneuvot kulkivat keskenään suunnilleen samaa vauhtia ajoneuvojen keskivauhdin ollessa 79–80 kilometriä tunnissa. Simulaation maksiminopeus 85 kilometriä tunnissa vastaa Rajamäen ja Lahden (2022) Suomen maanteiden suoraosuuksilla mitattavia raskaan liikenteen ajoneuvoja, joissa perävaunuttomien kuorma-autojen keskinopeus oli 86 kilometriä tunnissa, puoliperävaunuyhdistelmien 84 kilometriä tunnissa ja täysperävaunuyhdistelmien 83 kilometriä tunnissa.



Kuva 13. VECTO-ohjelman luoma analyysi ajoneuvon nopeudesta simuloitun matkan aikana 42 tonnin biometaanikäyttöisellä puoliperävaunuyhdistelmällä.

7.3 Ajoneuvoikohtainen polttoaineen kulutus

Raskaiden ajoneuvojen polttoaineiden kulutus on tutkielmassa laskettu VECTO-simuloinnilla ajoneuvotyyppi- ja käyttövoimakohtaisesti sekä kesä- että talvikausien osalta. VECTO-ohjelmalla on simuloitu suoraan diesel-, biometaani- sekä sähköajoneuvojen kulutuslukemat, kun taas tutkimuksessa käytetyt HVO-diesel- ja -vetyajoneuvojen kulutukset on johdettu diesel- ja sähköajoneuvoille saaduista luvuista.

Käyttövoima Ajoneuvotyyppi Massa Vuodenaika Kulutus (l/100 km)	Diesel					
	Puolip.yhd.		Täysp.yhd.		HCT-yhd.	
	42 t	42 t	64 t	64 t	76 t	76 t
Kesä	Talvi	Kesä	Talvi	Kesä	Talvi	
	43,03	51,85	54,66	66,66	60,47	73,87

Käyttövoima Ajoneuvotyyppi Massa Vuodenaika Kulutus (l/100 km)	HVO-diesel					
	Puolip.yhd.		Täysp.yhd.		HCT-yhd.	
	42 t	42 t	64 t	64 t	76 t	76 t
Kesä	Talvi	Kesä	Talvi	Kesä	Talvi	
	44,32	52,62	56,30	67,64	62,28	74,97

Käyttövoima Ajoneuvotyyppi Massa Vuodenaika Kulutus (kg/100 km)	Biometaan					
	Puolip.yhd.		Täysp.yhd.		HCT-yhd.	
	42 t	42 t	64 t	64 t	76 t	76 t
Kesä	Talvi	Kesä	Talvi	Kesä	Talvi	
	33,04	39,23	41,97	50,43	46,43	55,89

Käyttövoima Ajoneuvotyyppi Massa Vuodenaika Kulutus (kWh/100 km)	Sähkö					
	Puolip.yhd.		Täysp.yhd.		HCT-yhd.	
	42 t	42 t	64 t	64 t	76 t	76 t
Kesä	Talvi	Kesä	Talvi	Kesä	Talvi	
	196,72	238,17	247,31	304,51	272,38	337,57

Käyttövoima Ajoneuvotyyppi Massa Vuodenaika Kulutus (kg/100 km)	Polttokenno					
	Puolip.yhd.		Täysp.yhd.		HCT-yhd.	
	42 t	42 t	64 t	64 t	76 t	76 t
Kesä	Talvi	Kesä	Talvi	Kesä	Talvi	
	10,73	12,99	13,49	16,61	14,86	18,41

Taulukko 8. Ajoneuvojen VECTO-simuloidut kulutuslukemat puoliperävaunu, täysperävaunu- ja HCT-yhdistelmällä.

Dieselin energiatiheys on kesälaatuissa polttoaineissa 820–845 kg/m³ (Neste 2020b) ja talvilaatuissa 800–840 kg/m³ (Neste 2020c). Alhaisemman energiatihedden myötä talvilaatuisten dieselien arvioidaan kasvattavan dieselajoneuvojen kulutusta 1,50 prosenttia simuloituja arvoja korkeammaksi.

HVO-dieselin energiasisältö on noin 94,5 prosenttia dieselin energiasisällöstä uusiutuvan energian direktiivin mukaisesti (taulukko 4 luvussa 6.3.), mikä kasvattaa HVO-dieselin kulutusta dieselin verrattuna. HVO-dieselin paremmat palamisominaisuuksien tasoittavat kuitenkin tätä eroa, ja HVO-dieselin kulutuksen arvioidaan olevan kolme prosenttia

HVO-dieselin suurempi kuin dieselillä Nesteen (2020a) mukaisesti. Dieselistä poiketen talvilaatuisen HVO-dieselin kulutuksen arvioidaan pysyvän entisellään polttoaineen tiheyden säilyessä ennallaan tasolla 765–800 kg/m³ (Neste 2020a).

Polttokennoajoneuvoissa käytetään korkean hyötysuhteen sähkömoottoria, mutta polttokennossa syntyvän energiahävikin myötä ajoneuvojen hyötysuhteen arvioidaan energiankulutusta määrittäessä jäävän 55 prosenttiin Peters ym. (2021) mukaisesti. Vedyn energiatiheys on 120 MJ/kg eli 33,3 kWh/kg, jolloin ajoneuvon hyötysuhteeksi muodostuu 18,33 kWh/kg.

VECTO-simulointien pohjalta saadut kulutuslukemat on esitetty taulukossa 8. VECTO-simuloinnissa 42 tonnin painoisen dieselajoneuvon kulutus on kesällä 43,03 litraa/100 km eli 35,97 kilogrammaa/100 km, kun taas biometaanin kulutus on 33,04 kilogrammaa/100 km. Koska biometaanin energiatiheys on 50 MJ/kg ja dieselin 43 MJ/kg, biometaanilla kulkevan ajoneuvon energiankulutus on 6,8 prosenttia dieselajoneuvoa ja 3,7 prosenttia HVO-dieselillä kulkevaa ajoneuvoa suurempi eli biometaaniajoneuvon mitattu hyötysuhde jää jonkin verran dieselajoneuvosta. Tämä poikkeaa Alamian ym. (2016) arviosta, jonka mukaan energian hyötysuhde biometaania hyödyntävillä HPDI-moottoreilla vastaa dieselmoottorin hyötysuhdetta.

Sähkökäyttöisen ajoneuvojen vahvuudeksi on nähty niiden merkittävästi polttomoottoriajoneuvoja korkeampi energiatehokkuus. Dieselajoneuvon kulutus on kilowattitunneiksi muunnettuna simulaatiossa 42 tonnin ajoneuvolla 429,68 kWh/100 km, jolloin sähköisen ajoneuvon energiankulutus on yli 54 prosenttia dieselajoneuvoa alhaisempi. Polttokennoa hyödyntävän ajoneuvon energiankulutus jää myös noin 16,8 prosenttia dieselajoneuvon kulutusta alhaisemmaksi. Saatu tulos mukailee mm. Basman ja Rodríguezin (2022) huomiota, jonka mukaan vetyajoneuvot ovat energiatehokkuudeltaan selkeästi polttomoottoriajoneuvoja tehokkaampia, vaikka ne jäävätkin energiahävikin myötä huomattavasti sähköisten ajoneuvojen hyötysuhteesta.

Polttomoottorikäyttöisten ajoneuvojen suhteellinen kulutus kasvaa tulosten mukaan kaikilla kolmella energialähteellä eli dieselillä, HVO-dieselillä ja biometaanilla suunnilleen yhtä paljon massan ja olosuhteiden muuttuessa. Täysperävaunuyhdistelmän kulutus kasvoi kesällä 27 prosenttia ja HCT-yhdistelmän 41 prosenttia puoliperävaunuyhdistelmään verrattuna, ja talvella kasvu oli 1–2 prosenttiyksikköä kesää suurempaa. Sähköisten ajoneuvojen kulutuksen kasvu jää ajoneuvotyyppien välillä yllättäen hieman

polttomoottoriajoneuvoja alhaisemmaksi: kesällä kasvua oli täysperävaunuyhdistelmällä 26 prosenttia ja HCT-yhdistelmällä 39 prosenttia, ja talvella suhteellinen kasvu oli sähköisissäkin ajoneuvoissa pari prosenttiyksikköä korkeampi. Sähköisten ajoneuvojen energiakulutuksen kasvu on kuitenkin linjassa Traficommin (2021a) arvion kanssa, jonka mukaan 76 tonnin sähköisellä HCT-yhdistelmällä energiankulutus on hieman alle 1,5-kertainen 40 tonnin ajoneuvon verrattuna.

Talviset sääolosuhteet vaikuttivat kokonaisuudessaan merkittävästi ajoneuvojen kulutukseen. Dieselajoneuvoissa täysperävaunuyhdistelmän kulutus kasvoi lähes 20,5 prosenttia ja täysperävaunu- ja HCT-yhdistelmien kulutus 22 prosenttia kesään verrattuna. Uusiutuvaa dieseliä ja biometaania hyödyntävissä ajoneuvoissa kasvua oli vastaavasti 19 ja 20 prosenttia. Akku- ja polttokennokäyttöisissä sähköisissä ajoneuvoissa kulutus kasvoi suhteellisesti polttomoottoriajoneuvoja enemmän: puoliperävaunuyhdistelmissä kasvua oli 21 prosenttia, täysperävaunuyhdistelmissä 23 prosenttia ja HCT-yhdistelmissä 24 prosenttia.

Talven suhteelliset kulutuslukemat ovat pääsääntöisesti hieman korkeammat kuin verratuissa tutkimuksissa: esimerkiksi Kärhän ym. (2023) tutkimuksen mukaan 76 tonnin yhdistelmien kulutus kasvoi talvella Suomessa noin 7,3 litraa/100 km kesään verrattuna, kun VECTO-simuloidun tuloksen mukaan kulutus kasvaa jopa 13,4 litraa/100 km. Sähköajoneuvojen osalta Tol ym. (2022) arvioivat, että 500 kWh akun kapasiteetti laskisi -7 celsiusasteen lämpötilassa noin 5,5 prosenttia, ja suurempitehoisilla akuilla kulutuksen kasvu olisi tätä hieman suurempaa. Basma ym. (2021a) puolestaan näkivät laskun olevan vastaavissa olosuhteissa 500 kWh:n akulla 6 prosenttia. VECTO-simuloinnilla saadut kulutuslukemien kasvuprosentit ovat näin ollen huomattavasti korkeampia. Vastaava havainto voidaan tehdä polttokennoajoneuvojen osalta, sillä Basma ja Rodríguez (2022) arvioivat, että polttokennoajoneuvoissa energiatehokkuus laskee -7 celsiusasteessa noin 2–4 prosenttia.

Vaikka kulutuslukemien suhteellinen kasvu talviolosuhteissa onkin merkittävää, mukailtavat simulaatioista saadut lukemat Alonso-Villarin ym. (2022) tuloksia, joiden mukaan 40 tonnia painavan sähköisen ajoneuvon kulutuksen arvioivaan olevan talviolosuhteissa 261 kWh/100 km, mikä on hieman korkeampi kulutuslukema kuin tässä tutkimuksessa. Lisäksi vedyn kulutuslukemat vastaavat täsmällisesti Alonso-Villarin ym. tuloksia,

joiden mukaan vedyllä kulkevan 40 tonnin polttokennoajoneuvon kulutus talvisissa olosuhteissa on 13 kg/100 km.

Eri tutkimuksissa saatuja talvikulutuslukemia vertailtaessa on kuitenkin hyvä huomioida eroavaisuudet tutkimusten välillä käytetyissä muuttujissa, sillä tässä tutkimuksessa talven kulutuslukemien simulointiin on sisällytetty alhaisemman lämpötilan lisäksi myös lumen myötä muuttuneet ajo-olosuhteet korkeamman vierintävastuksen muodossa.

7.4 Kulutuksen vaikutus sähköisten ajoneuvojen käyttökustannuksiin

Sähköisten ajoneuvojen kustannukset poikkeavat tutkimuksessa muista ajoneuvoista siinä, että energian hinta vaihtelee latauspaikan mukaisesti: työpäivien päätteeksi käytettävän hitaan latauksen hinta on 16,2 senttiä/kWh, kun taas työpäivän aikana tehtävän pikalatauksen hinta on 28,2 senttiä/kWh. Sähköiselle ajoneuvolle on määritetty näin ollen energiankäytön kustannukset muista käyttövoimista poiketen ajoneuvotyyppi- ja kausikohtaisesti.

Sähköisissä ajoneuvoissa akkukapasiteetilla on huomattava merkitys ajoneuvon toimintasäteeseen. Ajoneuvovalmistajista Scania ja IVECO ovat tuomassa markkinoille 728 kWh:n akustolla kulkevat kuorma-autot (Iveco 2023; Scania 2024a), jonka pohjalta 728 kWh:n akustoa käytetään tutkielmassa sähköisten ajoneuvojen akuston kokonaiskapasiteettina.

Taulukosta 9 nähdään, että puoliperävaunuyhdistelmillä saavutetaan kesällä 370 kilometrin, täysperävaunuyhdistelmällä 294 ja HCT-yhdistelmällä 267 kilometrin toimintasäde. On kuitenkin huomioitava, että ajoneuvotyypeiltä edellytettävät kilometrisuoritteet kasvavat samalla kun niiden kilometrikohtainen kulutus kasvaa suuremman massan myötä. 728 kWh:n akkukapasiteetti ei riitä ilman työpäivän aikana tehtävää latausta kattamaan päiväkohtaista kilometrisuoritetta millään ajoneuvotyyppillä, joskin puoliperävaunuyhdistelmät kykenevät täyteen ladatulla akulla suoriutumaan yli 95-prosenttisesti yöllisestä latauksesta saadulla energialla. HCT-yhdistelmillä hitaalla latauksella saadaan sen sijaan alle kolmasosa päivittäisestä energiantarpeesta.

Käyttövoima Ajoneuvotyyppi	Sähkö		
	Puolip.yhd.	Täysp.yhd.	HCT-yhd.
Massa	42 t	64 t	76 t
Akun kapasiteetti (kWh)	728	728	728
Kulutus kesällä (kWh/100 km)	196,72	247,31	272,38
Kulutus talvella (kWh/100 km)	238,17	304,51	337,57
Kilometrisuorite/päivä	388	484	659
Toimintasäde kesällä (km)	370	294	267
Toimintasäde talvella (km)	306	239	216
Energiankulutus kesällä (kWh/päivä)	762	1198	1795
Energiankulutus talvella (kWh/päivä)	923	1475	2224
Hitaan latauksen osuus kesällä	0,955	0,608	0,406
Hitaan latauksen osuus talvella	0,789	0,493	0,327
Pikalatauksen osuus kesällä	0,045	0,392	0,594
Pikalatauksen osuus talvella	0,211	0,507	0,673

Taulukko 9. Sähköisten ajoneuvojen energiankulutus.

Ajoneuvojen simulaatiossa saadut kilometrilukemat jäävät selkeästi valmistajien ilmoittamista lukemista. Ajoneuvovalmistajista Daimler Truck (2022) ja DAF (2024a) ovat luvanneet puoliperävaunuyhdistelmilleen noin 500 kilometrin toimintasäteen ja Scania (2024b) mukaan 64 tonnin ajoneuvo saavuttaa 728 kWh:n avulla kesällä 375 kilometrin ja talviolosuhteissa noin 300 kilometrin toimintasäteen. Valmistajien ilmoittamat toimintasäteet ovat näin ollen jopa 25–35 prosenttia VECTO-simulaatiolla saatuja lukemia suurempia.

8 Kustannusvertailu

Kustannusvertailussa kustannukset on laskettu luvussa 6 esitellyn laskentamallin mukaisesti erikseen jokaiselle käyttövoimalle kunkin ajoneuvotyypin osalta. Kustannusvertailutaulukoissa on eritelty ajoneuvotyypeittäin ajoneuvo-, polttoaine- ja muut kustannukset sekä vuositasolla että diskontattuna ajoneuvon koko elinkaaren ajalta. Elinkaarikustannuksissa kokonaiskustannuksista on vähennetty ajoneuvon jäännösarvo, joka on taulukossa valmiiksi diskontattuna.

Ajoneuvokustannukset

Käyttövoima	Diesel	HVO-diesel	Biometaani	Sähkö	Polttokenno
Ajoneuvotyyppi	Puoliperävaunuyhdistelmä				
Massa	42 t	42 t	42 t	42 t	42 t
Ajoneuvon hinta	165 000	165 000	214 500	412 500	660 000
Korkoprosentti	2,942 %	2,942 %	2,942 %	2,942 %	2,942 %
Maksuaika (vuotta)	10	10	10	10	10
Vuosittainen lainaerä	19 286	19 286	25 072	48 215	77 143
Ajoneuvokust. yhteensä	165 000	165 000	214 500	412 500	660 000
Ajoneuvon jäännösarvo	13 257	13 257	17 235	33 143	53 030

Polttoainekustannukset

Ajokilometrit kesäkaudella	75 000	75 000	75 000	75 000	75 000
Ajokilometrit kesäkaudella	25 000	25 000	25 000	25 000	25 000
Kulutus kesällä per 100 km	43,03 l	44,32 l	33,04 kg	196,72 kWh	10,73 kg
Kulutus talvella per 100 km	51,85 l	52,62 l	39,23 kg	238,17 kWh	12,99 kg
Polttoaineen hinta (eur)	1,546	1,748	1,546	0,162/0,282	8,19
Polttoainekust. vuodessa (eur)	69 934	81 099	53 474	35 858	92 510
Polttoainekust. yhteensä	598 319	693 839	457 500	306 787	791 466

Muut kustannukset

Kilometrit vuodessa	100 000	100 000	100 000	100 000	100 000
Huoltokustannukset per km	0,163	0,163	0,158	0,133	0,133
Huoltokustannukset vuodessa	16 300	16 300	15 800	13 300	13 300
Vakuutuskustannukset vuodessa	5 500	5 500	5 500	5 500	5 500
Muut kustannukset vuodessa yht.	21 800	21 800	21 300	18 800	18 800
Muut kustannukset yhteensä	186 510	186 510	182 232	160 844	160 844

Kustannukset yhteensä	949 829	1 045 349	854 232	880 130	1 612 310
Elinkaarikustannukset	936 571	1 032 092	836 997	846 987	1 559 280

Taulukko 10. Puoliperävaunuyhdistelmien kustannusvertailu

Puoliperävaunuyhdistelmissä (taulukko 10) biometaanin- ja akkukäyttöinen sähköajoneuvo osoittautuvat elinkaarikustannuksiltaan edullisimmiksi valinnoiksi. Kustannuksissa on hienoinen ero biometaanijoneuvon hyväksi, sillä sen elinkaarikustannukset jäävät noin 1,2 prosenttia alhaisemmaksi kuin sähkökäyttöisen puoliperävaunuyhdistelmän. Vaikka sähkökäyttöisen ajoneuvon käyttökustannukset ovat selkeästi biometaanijoneuvoa alhaisemmat, sähköajoneuvon 200 000 euroa korkeampi ajoneuvon hinta kääntää vertailun hieman biometaanin eduksi. Dieselaajoneuvon kustannukset kasvavat taas lähes 12 prosenttia biometaanikäyttöistä ajoneuvoa korkeammaksi käyttökustannuksista syntyvät eron myötä. Huomionarvoista on, että dieselaajoneuvon polttoainekustannukset ovat jopa 31 prosenttia biometaanin ja 95 prosenttia sähköä korkeammat. HVO-dieselaajoneuvon kustannukset nousevat dieseliä korkeammaksi, sillä kustannusero näiden kahden välillä syntyy suoraan HVO-dieselin korkeammasta hinnasta. Polttokennoajoneuvo osoittautuu kustannuksiltaan merkittävästi muita vaihtoehtoja kalliimmaksi vaihtoehdoksi, ja sen kustannukset ovat 86 prosenttia biometaanijoneuvoa korkeammat.

Elinkaarikustannusten rakenteessa on merkittävää eroa eri käyttövoimien välillä: siinä missä polttomoottoriajoneuvoissa polttoainekustannusten osuus kokonaiskustannuksista vaihtelee biometaanin 54 prosentin ja HVO-dieselin 66 prosentin välillä, muodostaa energiakustannukset BEV-ajoneuvojen kokonaiskustannuksista ainoastaan 35 prosenttia. Kustannusrakenne vastaa Alonso-Villarin ym. (2022) tuloksia, jonka mukaan polttoainekustannukset muodostavat raskaissa ajoneuvoissa suurimman kustannuserän kaikissa muissa kuin sähkökäyttöisissä ajoneuvoissa. Tässä tutkimuksessa saaduissa tuloksissa on erityisesti polttomoottoriajoneuvoissa huomioitava huolto- ja vakuutuskustannusten merkittävä osuus kokonaiskustannuksista, sillä niiden osuus ylittää jopa ajoneuvokustannukset diesel- ja HVO-dieselaajoneuvoissa.

Täysperävaunuyhdistelmissä (taulukko 11) biometaanin on selkeästi muita käyttövoimia edullisempi vaihtoehto, ja kustannusero sähköisen ajoneuvon kustannuksiin on noin 4,5 prosenttia. Dieselaajoneuvon kustannukset ovat lähes 14 prosenttia korkeammat kuin biometaanilla kulkevan ajoneuvon. Sähköisen ajoneuvon käyttökustannukset ovat täysperävaunuyhdistelmissäkin alhaisimmat, mutta biometaanijoneuvon alhaisempi hankintakustannus kääntää elinkaarikustannukset biometaanijoneuvon eduksi myös täysperävaunuyhdistelmissä. HVO-diesel ja erityisesti polttokenno osoittautuvat tässäkin ryhmässä selkeästi muita kalliimmaksi vaihtoehdoksi.

Ajoneuvokustannukset

Käyttövoima	Diesel	HVO-diesel	Biometaani	Sähkö	Polttokeino
Ajoneuvotyyppi	Täysperävaunuyhdistelmä				
Massa	64 t	64 t	64 t	64 t	64 t
Ajoneuvon hinta	200 000	200 000	260 000	500 000	800 000
Korkoprosentti	2,942 %	2,942 %	2,942 %	2,942 %	2,942 %
Maksuaika (vuotta)	10	10	10	10	10
Vuosittainen lainaerä	23 377	23 377	30 390	58 442	93 507
Ajoneuvokust. yhteensä	200 000	200 000	260 000	500 000	800 000
Ajoneuvon jäännösarvo	16 070	16 070	20 890	40 174	64 278

Polttoainekustannukset

Ajokilometrit kesäkaudella	93 750	93 750	93 750	93 750	93 750
Ajokilometrit kesäkaudella	31 250	31 250	31 250	31 250	31 250
Kulutus kesällä per 100 km	54,66 l	56,30 l	41,97 kg	247,31 kWh	13,49 kg
Kulutus talvella per 100 km	66,66 l	67,64 l	50,43 kg	304,51 kWh	16,61 kg
Polttoaineen hinta (eur)	1,546	1,748	1,546	0,162/0,282	8,19
Polttoainekust. vuodessa (eur)	111 420	129 203	85 193	69 679	146 086
Polttoainekust. yhteensä	953 255	1 105 400	728 872	596 136	1 249 837

Muut kustannukset

Kilometrit vuodessa	125 000	125 000	125 000	125 000	125 000
Huoltokustannukset per km	0,22	0,22	0,22	0,19	0,19
Huoltokustannukset vuodessa	27 500	27 500	27 500	23 750	23 750
Vakuutuskustannukset vuodessa	5 500	5 500	5 500	5 500	5 500
Muut kustannukset vuodessa	33 000	33 000	33 000	29 250	29 250
Muut kustannukset yhteensä	282 332	282 332	282 332	250 249	250 249

Kustannukset yhteensä	1 435 587	1 587 732	1 271 204	1 346 385	2 300 086
Elinkaarikustannukset	1 419 517	1 571 662	1 250 314	1 306 211	2 235 807

Taulukko 11. Täysperävaunuyhdistelmien kustannusvertailu.

Käyttökustannusten osuus kokonaiskustannuksista kasvaa täysperävaunuyhdistelmissä puoliperävaunuyhdistelmiin verrattaessa: polttomoottoriajoneuvoissa polttoainekustannusten osuus on 57–70 prosenttia ja akkukäyttöisessä sähköajoneuvossa 44 prosenttia. Lisäksi huolto- ja vakuutuskustannukset nousevat ajoneuvokustannuksia korkeammaksi kaikissa vertailun polttomoottoriajoneuvoissa.

Ajoneuvokustannukset

Käyttövoima	Diesel	HVO-diesel	Biometaan	Sähkö	Polttokenno
Ajoneuvotyyppi	HCT-yhdistelmä				
Massa	76 t	76 t	76 t	76 t	76 t
Ajoneuvon hinta	220 000	220 000	286 000	550 000	880 000
Korkoprosentti	2,942 %	2,942 %	2,942 %	2,942 %	2,942 %
Maksuaika (vuotta)	10	10	10	10	10
Vuosittainen lainaerä	25 714	25 714	33 429	64 286	102 858
Ajoneuvokust. yhteensä	220 000	220 000	286 000	550 000	880 000
Ajoneuvon jäännösarvo	17 677	17 677	22 979	44 191	70 706

Polttoainekustannukset

Ajokilometrit kesäkaudella	127 500	127 500	127 500	127 500	127 500
Ajokilometrit kesäkaudella	42 500	42 500	42 500	42 500	42 500
Kulutus kesällä per 100 km	60,47 l	62,28 l	46,43 kg	272,38 kWh	14,86 kg
Kulutus talvella per 100 km	73,87 l	74,97 l	55,89 kg	337,57 kWh	18,41 kg
Polttoaineen hinta (eur)	1,546	1,748	1,546	0,162/0,282	8,19
Polttoainekust. vuodessa (eur)	167 734	194 505	128 251	115 853	219 233
Polttoainekust. yhteensä	1 435 052	1 664 085	1 097 256	991 182	1 875 646

Muut kustannukset

Kilometrit vuodessa	170 000	170 000	170 000	170 000	170 000
Huoltokustannukset per km	0,242	0,242	0,242	0,209	0,209
Huoltokustannukset vuodessa	41 140	41 140	41 140	35 530	35 530
Vakuutusmaksut vuodessa	5 500	5 500	5 500	5 500	5 500
Muut kustannukset vuodessa	46 640	46 640	46 640	41 030	41 030
Muut kustannukset yhteensä	399 029	399 029	399 029	351 032	351 032

Kustannukset yhteensä	2 054 081	2 283 114	1 782 285	1 892 215	3 106 679
Elinkaarikustannukset	2 036 404	2 265 437	1 759 305	1 848 023	3 035 973

Taulukko 12. HCT-yhdistelmien kustannusvertailu.

Kustannusten vertailu HCT-yhdistelmien (taulukko 12) välillä ei tuo juurikaan muutoksia kustannuseroihin, ja biometaan on myös HCT-yhdistelmissä edullisin vaihtoehto. HCT-yhdistelmissä biometaanin ja sähkön hintaero kasvaa viiteen prosenttiin. Dieseliin verrattuna hintaero kasvaa puolestaan lähes 16 prosenttiin. HVO-diesel osoittautuu jo lähes 30 prosenttia kalliimmaksi vaihtoehdoksi, ja vetykäyttöinen polttokenno on tässäkin ryhmässä selkeästi kallein vaihtoehto.

Biometaan osoittautuu näin ollen kaikissa ajoneuvoluokissa edullisimmaksi vaihtoehdoksi. Dieselin ajoneuvokustannukset ovat kaikissa ajoneuvotyypeissä alhaisimmat, kun taas sähköisten ajoneuvojen energiankäytöstä syntyvät kustannukset ovat kaikissa

ajoneuvoryhmissä selkeästi alhaisimmat. Biometaaniaajoneuvo on kuitenkin kilpailukykyinen sekä ajoneuvo- ja polttoainekustannuksiltaan, minkä myötä sähköisen vaihtoehdon korkeampi ajoneuvokustannus ja vastaavasti dieselajoneuvon korkeammat käyttökustannukset nostavat niiden elinkaarikustannukset biometaania korkeammalle tasolle. Saadut tulokset myötäilevät Viinikaisen ym. (2023) havaintoja, joiden mukaan sähkökäyttöisten raskaiden ajoneuvojen kulurakenne poikkeaa huomattavasti erityisesti dieselajoneuvoista. Vaikka käyttökustannukset ovat sähköisillä ajoneuvoilla polttomootoriajoneuvoja alhaisemmat, se ei riitä kompensoimaan muita ajoneuvoja merkittävästi korkeampia hankintakuluja elinkaaren aikana. Samalla saadut tulokset tukevat myös Rajalehdon ja Helon (2025) huomiota, että nestemäinen biometaani ja sähkö ovat vaihtoehtoisista käyttövoimista osoittautuneet toistaiseksi kilpailukykyisimmiksi ratkaisuiksi fossiilisten polttoaineiden käytön vähentämiseksi raskaassa liikenteessä.

Kustannustekijöiden osalta polttoainekustannusten osuus saaduissa tuloksissa korostuu Tilastokeskuksen (2024d) ylläpitämään kuorma-autoliikenteen kustannusindeksiin verrattuna. Vuosien 2023 ja 2024 keskiarvohintoja käytettäessä puoliperävaunuyhdistelmissä polttoainekustannuksen osuus tarkasteltujen kustannusten osalta oli 52 prosenttia ja HCT-yhdistelmissä 53 prosenttia, kun vastaavat luvut dieselajoneuvolle tässä tutkimuksessa olivat 63 ja 70 prosenttia. Tutkielman korkeammat polttoainekustannukset selittyvät ensisijaisesti sillä, että kustannuslaskennassa ajoneuvojen kulutus on laskettu maksimikapasiteetin mukaisesti, vaikka käytännössä ajoneuvot eivät pysty saavuttamaan kaikissa kuljetuksissa täyttä painokapasiteettia.

Tilastokeskuksen indeksissä ajoneuvokustannusten osuus kasvoi puoliperävaunuyhdistelmästä HCT-yhdistelmään siirryttäessä 25:stä 26 prosenttiin, kun taas tässä tutkielmassa osuus laski 17 prosentista 11 prosenttiin. Tilastokeskuksen (2022) mukaan kalustoon kohdistuvien poistojen osuus on ollut kasvussa ajoneuvojen lyhyempien pitoaikojen myötä, jolloin esim. HCT-yhdistelmissä käytettävän kaluston käyttöikä voi käytännössä olla tutkimuksessa määriteltä 10 vuoden käyttöikää alhaisempi. Lyhyempi vaihtoväli voi käytännössä samalla vaikuttaa laskevasti ajoneuvojen huolto- ja korjauskustannuksiin, koska niiden suhteellisen osuuden voidaan perustellusti olettaa kasvavan ajoneuvon käyttöiän ja kilometrimittarilukeman noustessa. Tällöin ajoneuvon vaihtaminen voi osoittautua taloudellisesti kannattavaksi.

Sähköisten ajoneuvojen nähdään yleisesti saavuttavan etua polttomoottoriajoneuvoihin alhaisempien käyttökustannusten myötä. Kirjallisuudessa alhaisemmat kustannukset johtavat usein päätelmään, että alhaisempien käyttökustannusten myötä sähköisten ajoneuvojen kustannuskilpailukyky kasvaa ajomäärän kasvaessa. Eri ajoneuvotyyppien kustannuksia tarkasteltaessa voidaan kuitenkin huomata, että erityisesti biometaanin kilpailukyky sähköön verrattuna paranee ajokilometrien ja kulutusmäärän kasvaessa. Puoliperävaunuyhdistelmissä sähköisen ajoneuvon energiakustannukset ovat noin 150 000 euroa biometaania alhaisemmat. Täysperävaunuyhdistelmissä ero supistuu 130 000 euroon ja HCT-yhdistelmissä ero on alle 100 000 euroa. Vaikka sähköisen ajoneuvon kilometrikustannukset ovatkin biometaania alhaisemmat, voidaan vertailusta nähdä, että sähköisen ajoneuvon alhaisemmat käyttökustannukset perustuvat hitaan latauksen mahdollistamaan edulliseen sähköenergiaan. Edullisella hitaalla sähköllä ajettaessa käyttökustannukset ovat sähköisillä ajoneuvoilla 38 prosenttia biometaaniverrokkeja alhaisemmat, kun taas pikaladattavan sähköön käyttökustannukset osoittautuvat yli 8 prosenttia biometaania kalliimmiksi.

Biometaanin dieseliä alhaisemmat huoltokustannukset vastaavat suomalaisten kuljetusyritysten kokemuksia. Yritysten mukaan kaasuajoneuvojen käyttövarmuuden on koettu olevan dieselajoneuvoja parempi, jonka myötä huoltoihin ja korjauksiin vaadittavien kulujen osuus on ollut matalampi (Viinikainen ym. 2023; SKAL 2023b). Tähän voi vaikuttaa osittain se, että dieselajoneuvojen katalysaattorissa käytettävän AdBlue-urealisäaineen nähdään aiheuttavat ongelmia Suomessa talvella, sillä lisäaine ei toimi suunnitellusti kylmässä pakkassäässä (Yle 2024).

Käyttövoima	Diesel	HVO-diesel	Biometaani	Sähkö	Polttokenno
Ajoneuvotyyppi	Puoliperävaunuyhdistelmä				
Kilometrit vuodessa	100 000	100 000	100 000	100 000	100 000
Elinkaarikustannukset (euroa)	936 571	1 032 092	836 997	846 987	1 559 280
Euroa/km	0,94	1,03	0,84	0,85	1,56
Ajoneuvotyyppi	Täysperävaunuyhdistelmä				
Kilometrit vuodessa	125 000	125 000	125 000	125 000	125 000
Elinkaarikustannukset (euroa)	1 419 517	1 571 662	1 250 314	1 306 211	2 235 807
Euroa/km	1,14	1,26	1,00	1,04	1,79
Ajoneuvotyyppi	HCT-yhdistelmä				
Kilometrit vuodessa	170 000	170 000	170 000	170 000	170 000
Elinkaarikustannukset (euroa)	2 036 404	2 265 437	1 759 305	1 848 023	3 035 973
Euroa/km	1,20	1,33	1,03	1,09	1,79

Taulukko 13. Kilometrikustannukset ajoneuvotyypeittäin.

Kilometrikustannukset ajoneuvotyypeittäin on esitetty taulukossa 13. Puoliperävaunuyhdistelmissä biometaanin kilometrikohtaiset kustannukset ovat 0,84 euroa kilometriltä. Sähköllä ajettaessa kustannus kasvaa yhdellä sentillä ja dieselillä kymmenellä sentillä kilometriltä. Täysperävaunuyhdistelmissä biometaanin käytön kustannus on 1,00 euroa kilometriltä, ja HCT-yhdistelmissä vastaava kustannus on 1,03 euroa. Polttokennon kilometrikohtaiset kustannukset ovat useita kymmeniä senttejä biometaania ja sähköä kalliimmat kaikissa ajoneuvoluokissa. Ajoneuvojen kulutuslukemat kasvavat raskaammissa ajoneuvoyhdistelmissä korkeampien kulutuslukemien myötä. Sen tarkempia päätelmiä ajoneuvotyyppien välillä ei ole mielekästä tehdä, sillä ajoneuvotyyppien vuosittaiset kilometrisuoritteet eroavat toisistaan merkittävästi. Tarkempi ajoneuvotyyppien välinen kustannusvertailu hyötykapasiteetin osalta on jätetty tämän tutkimuksen ulkopuolelle.

Elinkaarikustannusten vertailussa saadut tulokset ovat linjassa Anderhofstadtin ja Spinlerin (2020) kanssa, sillä he arvioivat kehittyvien käyttövoimien osalta metaania hyödyntävän ajoneuvon pysyvän parhaana vaihtoehtona käyttäjille vuoteen 2030 asti alhaisien kustannusten ja pitkän toimintasäteen myötä. He arvioivat kuitenkin sähkö- ja vetyajoneuvojen nousevan sen jälkeen parhaiksi vaihtoehdoiksi kustannusten laskun ja latausnopeuden kasvun myötä. Viinikainen ym. (2023) vastaavasti arvioivat, että biometaanilla kulkevien raskaiden ajoneuvojen dieseliä korkeampi hankintahinta on kompensoitavissa auton elinkaaren aikana, jolloin kokonaiskustannukset jäisivät alhaisemmaksi. Toisaalta Takman ja Andersson-Sköld (2021) arvioivat nestemäistä biometaania käyttävien raskaiden ajoneuvojen kokonaiskustannusten olevan Ruotsissa merkittävästi dieseliä suurempia, joskin hankintakustannuksiin myönnettyjen tukien myötä kustannusero supistui prosentin kymmenyksiin. Rial ja Pérez (2021) taas arvioivat metaaniaajoneuvojen elinkaarikustannusten olevan 12–14 prosenttia suuremmat kuin dieselajoneuvoilla. Kustannuksia vertaillessa on hyvä huomioida, että mm. erot polttoaineiden pumppuhinnoissa eri maiden välillä voivat vaikuttaa saatuihin kokonaiskustannuksiin.

Sähköisten ajoneuvojen osalta tulokset mukailevat Routin ym. (2022) saamia tuloksia, jonka mukaan raskaiden sähköisten ajoneuvojen kustannukset ovat jo nykyisellään dieseliä alhaisemmat. Vaikka polttokennoajoneuvojen kustannustehokkuus paranee heidän mukaansa vuoteen 2050 mennessä, sen ei kuitenkaan odoteta saavuttavan sähkön kustannustasoa. Vastaavasti Parviziomranin ja Bergqvistin (2023) mukaan sähkö osoittautui edullisemmaksi vaihtoehdoksi dieseliin ja vetyyn verrattuna. He ovat samaa mieltä

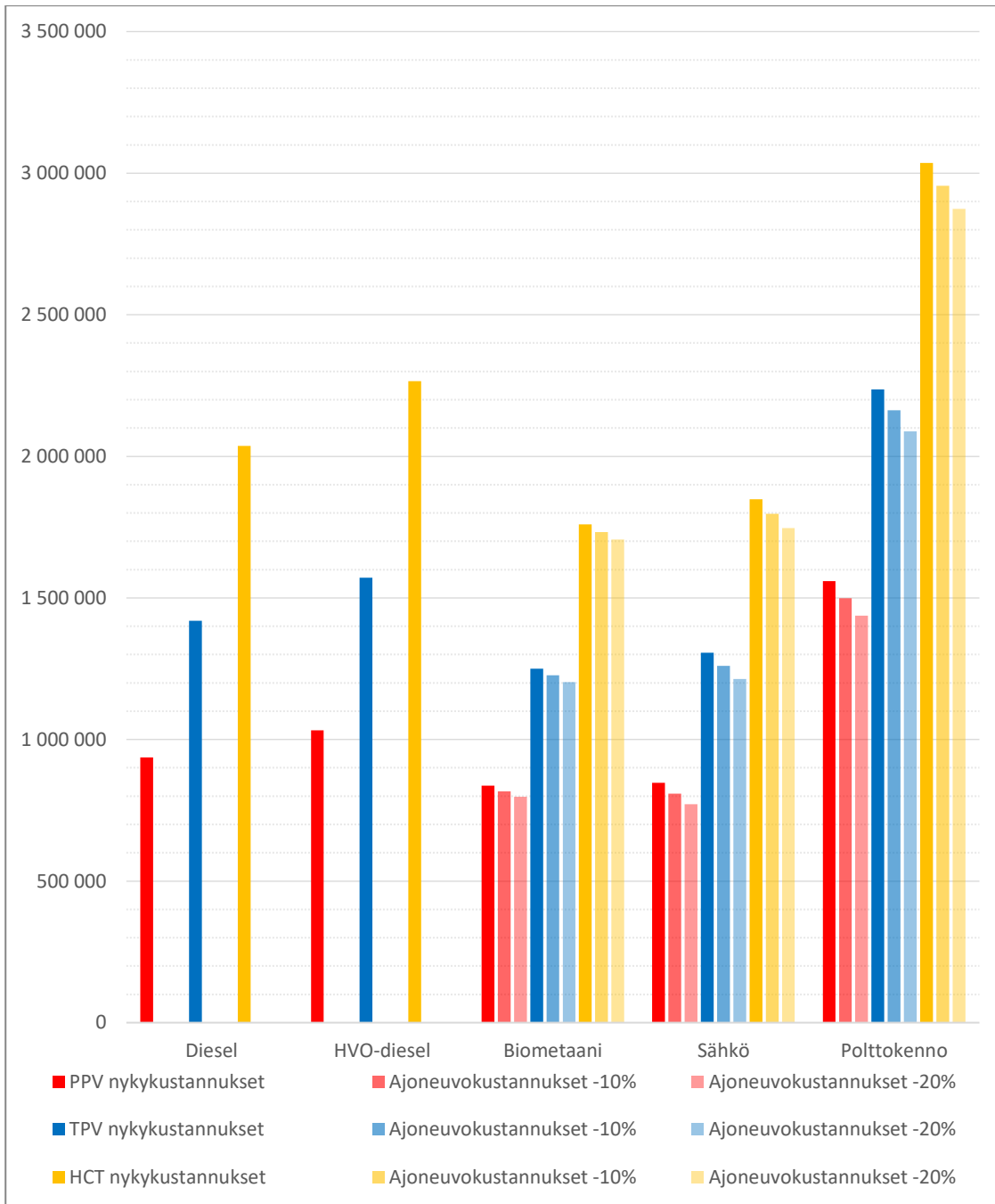
edellisten kanssa siitä, ettei polttokennon kilpailukyky merkittävästi kasva tulevina vuosikymmeninä.

8.1 Ajoneuvokustannusten vaikutus elinkaarikustannuksiin

Dieselajoneuvoilla on muita käyttövoimia alhaisemmat kustannukset suurempien tuotantomäärien ja kypsemmän tekniikan myötä (Transport & Environment 2021b). Sähköisissä ajoneuvoissa erityisesti akuston kustannukset kasvattavat ajoneuvojen hintatasoa. Teknologian kehitys ja kasvavat markkinaosuudet voivat kuitenkin supistaa merkittävästi vaihtoehtoisten käyttövoimien kustannuseroa verrattuna dieselkäyttöisiin ajoneuvoihin. Rahtiliikenteessä alan markkinatoimijat arvioivat akkujärjestelmien hintojen lähes puollittuvan vuosien 2020 ja 2030 välillä, kun taas polttokennojärjestelmien hintojen odotetaan laskevan jopa 60 prosenttia samalla aikavälillä (Link ym. 2024). Litiumioniakkujen hinta on laskenut jopa odotettua nopeammin: vuonna 2024 akkujen kustannus oli noin 110 euroa/kWh, kun se vielä vuotta aiemmin oli noin 140/kWh (Statista 2025).

Ajoneuvokustannusten lasku voi vaikuttaa merkittävästi erityisesti sähköisten ajoneuvojen yleistymiseen. Esimerkiksi Nykvistin ja Olssonin (2021) mukaan muutokset mm. akkujen kustannuksissa ja kapasiteetissa elinkaaren aikana vaikuttavat erittäin herkästi akkukäyttöisten sähkökuorma-autojen kustannuskilpailukykyyn perinteisiin dieselkäyttöisiin kuorma-autoihin verrattuna. Suurilla yrityksillä on käytännössä usein mahdollisuus saada paremmat ehdot rahoitukselle, minkä myötä siirtymä vähäpäästöisiin ajoneuvoihin voi olla taloudellisesti järkevämpää suurille kuin pienille kuljetusalan yrityksille (Parviziomran & Bergqvist 2023). Sähköisten ajoneuvojen korkeampi hankintahinta kasvattaa rahoitukseen liittyviä riskejä erityisesti pienillä kuljetusyrityksillä, sillä ajoneuvon kohdistuvien poistojen määräksi voi muodostua jopa 30 prosenttia liikevaihdosta (Viinikainen ym. 2023). Alhaisemman hankintahinnan myötä ajoneuvojen rahoitus ei muodostaisi nykyistä riskitasoa.

Kuvassa 14 on esitetty hankintakustannusten vaikutus kaasu-, sähkö- ja polttokennoyhdistelmien elinkaarikustannuksiin, mikäli ajoneuvojen kustannukset laskisivat 10 ja 20 prosenttia. Dieselajoneuvoille vastaavia vaikutuksia ei ole arvioitu, sillä niiden suhteellisen kustannuksen odotetaan säilyvän nykytasolla.



Kuva 14. Ajoneuvojen hankintakustannusten vaikutus ajoneuvoyhdistelmien elinkaarikustannuksiin. Puoliperävaunuyhdistelmien (PPV) käyttövoimakohtaiset kustannukset punaisella, täysperävaunuyhdistelmien (TPV) sinisellä ja HCT-yhdistelmien keltaisella.

Puoliperävaunuyhdistelmissä (kuvassa punaisella) kymmenen prosentin vähennys ajoneuvon hankintahinnassa laskee biometaaniajoneuvon elinkaarikustannuksia noin 20 000 euroa, sähköisen ajoneuvon 37 000 euroa ja polttokennoajoneuvon 61 000 euroa. Kahdenkymmenen prosentin vähennys kaksinkertaistaa luetellut kustannushyödyt. Koska ajoneuvokustannusten osuus elinkaarikustannuksista on suurin sähköisillä ajoneuvoilla,

vaikuttaa niiden kustannuksiin hintojen lasku suhteellisesti eniten. 10 prosentin hinnanalasku leikkaa sähköisen akkukäyttöisen ajoneuvon elinkaarikustannuksia noin 4,5 prosenttia, kun taas biometaaniajoneuvolla kustannusvaikutus jää 2,4 prosenttiin. Hinnanmuutos vaikuttaakin elinkaarikustannuksiin siten, että kymmenen prosentin leikkaus ajoneuvojen hinnoista laskee sähköisen ajoneuvon elinkaarikustannuksia n. 8 200 euroa biometaania alhaisemmiksi, ja 20 prosentin lasku hankintahinnassa kasvattaa eron jo n. 26 400 euroon.

Täysperävaunuyhdistelmissä (kuvassa sinisellä) kymmenen prosentin vähennys ajoneuvon hankintahinnassa laskee hankintakustannuksia puoliperävaunuyhdistelmiä enemmän korkeampien hankintahintojen myötä. Kymmenen prosentin hinnan lasku leikkaa biometaaniajoneuvon elinkaarikustannuksia noin 24 000 euroa, sähköajoneuvon 46 000 euroa ja polttokennoajoneuvon 74 000 euroa. Koska täysperävaunuyhdistelmissä polttoaineen osuus kustannuksista kasvaa merkittävästi, vaikuttaa 10 prosentin säästö hankintahinnassa tässä ajoneuvotyypissä suhteellisesti vähemmän kuin puoliperävaunuyhdistelmissä: sähköisissä ajoneuvoissa kustannussäästö on noin 3,5 prosenttia ja biometaanilla 1,9 prosenttia. Täysperävaunuyhdistelmissä biometaani säilyy elinkaarikustannuksiltaan edullisimpana vaihtoehtona ajoneuvokustannusten laskiessakin, joskin 20 prosentin hintojen laskulla ero sähköiseen ajoneuvoon pienenee alle 12 000 euroon.

HCT-yhdistelmissä (kuvassa keltaisella) alhaisemmista hankintakustannuksista saavutetut säästöt ovat ainoastaan muutamia tuhansia euroja täysperävaunuyhdistelmiä korkeampia. Samalla suhteelliset säästöt jäävät vielä alhaisemmiksi: sähköllä 2,7 prosenttiin ja biometaanilla 1,5 prosenttiin. Biometaanin elinkaarikustannukset sähköön verrattuna pysyvät kymmenissä tuhansissa euroissa kustannusten laskusta huolimatta.

Polttokennoajoneuvon kustannukset säilyvät ylivoimaisesti muita vaihtoehtoja korkeampana kaikissa ajoneuvoluokissa, vaikka alhaisemmat hankintahinnat vaikuttavat eniten niiden hankintakustannuksiin. Koska polttokennoajoneuvon polttoainekustannukset ovat myös merkittävästi muita ajoneuvoja korkeammat, jää elinkaarikustannusten suhteellinen väheneminen kuitenkin akkukäyttöisiä sähköisiä ajoneuvoja alhaisemmaksi kaikissa ajoneuvotyypeissä.

8.2 Polttoainekustannusten vaikutus elinkaarikustannuksiin

Polttoainekustannukset muodostavat suurimman osan ajoneuvojen elinkaarikustannuksista. Polttomoottoriajoneuvoissa osuus vaihteli biometaanilla kulkevan puoliperävau-nuyhdistelmän 54 prosentin ja HVO-dieselillä kulkevat HCT-yhdistelmän 73 prosentin välillä. Sähköisissä ajoneuvoissa energiankulutus muodosti 35–52 prosenttia elinkaari-kustannuksista ja polttokennoajoneuvoissa 49–60 prosenttia. Koska polttoainekustannuk-set muodostavat suurimman osan polttomoottoriajoneuvojen elinkaarikustannuksista, energian hinnan muutokset vaikuttavat niihin sähköajoneuvoja voimakkaammin (Basma ym. 2022). Vaikka dieselajoneuvojen hankintakustannukset ovat vaihtoehtoisia käyttö-voimia edullisemmat, biometaanilla ja sähköllä kulkevien ajoneuvojen käyttökustannuk-set ovat dieseliä alhaisemmat. Kustannusvertailussa saadut tulokset tukevat suomalaisten kuljetusalan yritysten arvioita, joiden mukaan vaihtoehtoisilla käyttövoimilla kulkevien ajoneuvojen käyttökustannusten nähdään olevan pääsääntöisesti dieselajoneuvoja alhai-semmat (SKAL 2023b).

Energialähteiden hintoihin liittyy kuitenkin huomattavia epävarmuuksia, ja sekä sähkön että polttoaineiden hintakehityksen arviointi on äärimmäisen haasteellista (Parviziomran & Bergqvist 2023). Muutokset polttoaineiden hinnoissa vaikuttavat samalla merkittävästi ajoneuvojen arvioituihin elinkaarikustannuksiin, mikä saattaa tehdä käyttövoimien kus-tannusvertailusta epätarkkaa. Tämä on noussut esille myös Viinikaisen ym. (2023) suo-malaisille kuljetusalan yrityksille tekemissä haastatteluissa, joissa korostuivat erityisesti vaihtoehtoisten käyttövoimien elinkaarikustannusten arvioinnin vaikeus energianlähtei-den hintaheilahtelujen myötä. Tavaraliikenteen toimijoilla on Moilasan ym. (2021) mu-kaan samalla myös heikot mahdollisuudet reagoida muutoksiin polttoaineiden hinnoissa.

Dieselin litrahinnaksi on tutkimuksessa määritelty 1,516 euroa Tilastokeskuksen (2024b) aineiston pohjalta tammikuun 2021 ja heinäkuun 2024 välisen ajanjakson verottoman keskihinnan mukaisesti. Ajanjakson aikana dieselin hinta on kuitenkin vaihdellut voimak-kaasti: edullisimmillaan dieselin arvonlisäveroton hinta oli tammikuussa 2021, jolloin dieselin hinta oli 1,113 euroa litralta, ja kalleimmillaan kesäkuussa 2022, jolloin hinta nousi jopa 1,968 euroon Venäjän hyökättyä Ukrainaan muutamaa kuukautta aiemmin. Dieselin hinta on näin ollen ollut alimmillaan 26,6 prosenttia keskihintaa alhaisempi ja korkeimmillaan 29,8 prosenttia keskihintaa korkeampi. Samalla dieselin hinta nousi tam-mikuun 2021 jälkeen vajaassa puolessatoista vuodessa peräti 72 prosenttia. Koska HVO-

dieselin hinta on voimakkaasti sidoksissa dieselin hintaan, on sen hintakehitys vastannut dieselin hintakehitystä.

Tulevaisuudessa dieselin hinta voi nousta merkittävästi, mikäli jakeluvelvoitetta nostetaan nykyisestä 16,5 prosentin tasosta laissa määriteltyyn 34 prosenttiin vuoteen 2030 mennessä. Lisäksi päästöoikeuksien hinta voi vaikuttaa tulevana vuosina merkittävästi dieselaajoneuvojen polttoainekuluihin. Päästöoikeuden hinnan jäädessä 90 euroon tonnilta dieselin hinta nousisi n. 0,14 euroa litraa kohden, mutta 340 euron tonnihinta merkitsisi jo noin 0,52 euron litraa kohtaisen korotusta (Moilanen ym. 2021).

Biometaanin hintatasoon vaikuttaa mm. hankinta- ja tuotantokustannukset, siirtokulut sekä markkinatilanne (Gasum 2024b). Biometaanin hinta on vaihdellut dieselin tapaan voimakkaasti. Esimerkiksi Gasumin asemilla biometaanin veroton kilohinta vaihteli vuonna 2022 1,27 ja 1,69 euron välillä. Heinäkuussa 2024 biometaanin hinta oli laskenut 1,34 euroon/kg, jonka jälkeen hinta on noussut yhdeksässä kuukaudessa yli 30 prosenttia ollen huhtikuussa 2025 1,75 euroa/kg (Gasum 2025).

Biometaanin verotuksella voi olla huomattava vaikutus kaasun jakeluhintaan, mikä vaikuttaa edelleen kaasulla toimivien ajoneuvojen kokonaiskustannuksiin (Osorio-Tejada ym. 2017). Biometaanin hyödyntäminen edellyttääkin, että sen kustannukset saadaan esimerkiksi alhaisemman verotuksen avulla fossiilisia polttoaineita edullisemmaksi (Transport & Environment 2021a). Tämä toteutuu jo nykytilanteessa Suomessa, jossa polttoaineena käytettävä nesteytetty metaani on pääasiassa bioperäistä. Biometaanin tuotantotapa ja raaka-aineiden saatavuus voivat kuitenkin vaikuttaa huomattavasti hintatasoon. Esimerkiksi Gustafsson ja Svensson (2021) arvioivat, että biometaania voidaan tuottaa edullisimmillaan ruokajätteestä hintaan 0,39 euroa/kg. Tuotantokustannukset voivat kuitenkin vaihdella merkittävästi biokaasulaitosten välillä, sillä energian hinta, tuotantokapasiteetti ja käytettävä biomassa vaikuttavat lopullisiin tuotantokustannuksiin. Nollapäästöistä metaania voidaan tuottaa myös synteettisesti vedystä, mutta sen kustannukset tulevat muiden e-polttoaineiden tapaan todennäköisesti säilymään fossiilisia vaihtoehtoa merkittävästi kalliimpina vuosikymmenten ajan (Transport & Environment 2021a).

Sähköenergian hintatason määrittelyssä on käytetty Tilastokeskuksen (2024c) keräämiä sähkön arvonlisäverottomia kuukausikohtaisia keskihintoja vuosien 2022–2024 välillä. Vaikka ajoneuvon käytöstä syntyvät kustannukset ovatkin sähköisillä ajoneuvoilla

polttomoottoriajoneuvoja alhaisemmat, sähkön hintavaihtelu voi olla vielä huomattavasti suurempaa kuin polttoaineiden (Viinikainen ym. 2023). Sähköenergian hinta on tarkastellulla aikavälillä ollut keskimäärin 9,43 senttiä kilowattitunnilta, mutta sähkön hinta on vaihdellut voimakkaasti: alhaisimmillaan kuukausikohtainen keskihinta on ollut 5,71 senttiä kilowattitunnilta ja korkeimmillaan 19,62 senttiä kilowattitunnilta. Vaikka sähkön kuukausikohtainen vaihtelu on huomattavasti suurempaa kuin polttoaineilla, vaihtelee sähkön todellinen hinta vielä huomattavasti tätä enemmän. Sähkön kysyntä on suurimmillaan talvisin kylminä arkipäivinä ja alhaisimmillaan lämpiminä kesäöinä. Vastaavasti tuotantomäärät vaihtelevat merkittävästi mm. sääolosuhteiden mukaan. Sähkön pörssi-hinta muodostuukin kysynnän ja tarjonnan perusteella erikseen jokaiselle tunnille. (Fingrid 2025). Alhaisimmillaan sähkön hinta voi olla negatiivinen, mutta korkeimmillaan hinta voi nousta jopa monikymmenkertaiseksi keskiarvoon verrattuna. Sähköenergian hinnan lisäksi kokonaishintaan vaikuttavat sähkönsiirrosta ja veroista syntyvät maksut (Fortum 2025), ja sähköisten ajoneuvojen kohdalla myös infrastruktuurin rakentamisesta syntyvät kulut.

Edullisen sähkön käyttö on ensiarvoisen tärkeää sähköisten kuorma-autojen kustannusten vähentämiseksi (Basma ym. 2022). Erityisesti yöaikaan tehtävällä hitaalla latauksella voidaan vaikuttaa merkittävästi latauksesta muodostuviin kustannuksiin. Toisaalta päivittäisiin hinnanvaihteluihin reagoiminen voi olla erittäin haasteellista, mikäli ajoneuvoja tulee ladata päivittäin. Kokonaiskustannusten kannalta on erittäin tärkeää huomioida myös eri palveluntarjoajien ylläpitämien latauspisteiden keskinäiset hintaerot, jotka voivat olla korkeimmillaan kolminkertaiset (Viinikainen ym. 2023).

Vedyn kustannusten arviointi on vielä muitakin polttoaineita haastavampaa, sillä erityisesti elektrolyysillä tuotetun puhtaan vedyn kustannuksista esitetyt arviot vaihtelevat huomattavasti, ja tässä tutkielmassa vedyn energia- ja arvonlisäverottomaksi hinnaksi on arvioitu Saksan hintojen mukainen 8,19 euroa/kg. Vedyn hintaskaala on kuitenkin erittäin laaja. Yleisimmin vedyn tuotannossa käytetään maakaasun höyryreformointia edullisimpien tuotantokustannusten myötä. Tuotetun vedyn kustannus on tällöin noin 0,70–2,00 euroa/kg. Hiilidioksidin talteenotto eli ns. sinisen vedyn tuottaminen lisää kustannuksia arviolta 0,5–1 euroa/kg, mutta menetelmän käyttöönnotossa on haasteita mm. tuotantoinfrastruktuurin osalta. (Mohideen ym. 2023).

Nollapäästöinen liikenne edellyttää kuitenkin uusiutuviin energianlähteisiin perustuvan vedyn käyttöä, jolloin kustannukset ovat huomattavasti korkeammat kuin uusiutumattomalla energialla tuotetulla vedyllä. Jotta sähköstä saadaan tuotettua vetyä kustannustehokkaasti, tulee vedyn tuotantokapasiteetin olla korkea samalla kun sähkön hinta on edullista (Mohideen ym. 2023). Koska vihreän energian tuotanto on vaihtelevien sääolosuhteiden myötä melko epätasaista, on myös vihreän energian hinnassa merkittäviä vaihteluita (UNECE 2021). Vaikka vaihtelevat olosuhteet mahdollistavat vedyn tuotannon edullisella sähköllä, on korkea tuotantokapasiteetti samanaikaisesti vaikeasti saavutettavissa.

Routin ym. (2022) mukaan vihreän vedyn tuotantokustannuksissa voitaisiin saavuttaa hintatasoksi noin 2,70 euroa/kg, mikäli vetyä tuotettaisiin täysin maksuttomasta sähköstä. Mikäli sähkön keskihinta nousisi 0,085 euroa/kWh, nousisi vihreän vedyn hinta jo noin 7 euroon/kg. UNECE:n (2021) arvio ydinenergialla tuotetun vedyn potentiaalisesta tuotantohinnasta asettuu 4,0–6,5 euroon/kg.

Vedyn paikallinen tuotanto voi vaikuttaa merkittävästi vedyn kustannuksiin, sillä vedyn kuljetus muodostaa huomattavan osan vedyn kokonaiskustannuksista (Brändle ym. 2021). Sipilä ja Lottonen (2024) arvioivat, että Suomessa voitaisiin tuottaa vetyä hintaan 1,52 euroa/kg, mikäli sähkön hinta olisi 4,2 senttiä/kWh. Tällöin vedyn markkinahinta voisi heidän mukaansa olla arviolta 3,15 euroa/kg. Zhou ja Searle (2022) taas arvioivat, että elektrolyysillä tuotetun vedyn tuotantokustannukset voisivat olla Suomessa 5,0 euroa/kg, mutta pumppuhinta olisi tällöin suunnilleen kaksinkertainen.

Tuotantohinnan lisäksi vedyn kokonaishintaan vaikuttaa myös vedyn olomuotoon, säilyttämiseen ja jakeluun liittyvät kustannukset. Sensin ym. (2024) mukaan puristetun kaasumaisen vedyn tankkauskustannusten arvioidaan olevan noin 4–8 euroa/kg vuonna 2030, ja nestemäisen vedyn tankkauskustannusten arvioidaan olevan tällöin 5–12 euroa/kg. Jakeluaseman kustannuksiin vaikuttaa merkittävästi aseman käyttöaste, jolloin vetyajoneuvojen määrän kasvu mahdollistaa edullisemmat jakeluhinnat (Ulleberg & Hancke 2020).

Käyttövoima	Diesel	HVO-diesel	Biometaani	Sähkö	Polttokenno
Polttoainekustannukset -20 %	816 908	893 324	745 497	785 629	1 400 987
Polttoainekustannukset -10 %	876 740	962 708	791 247	816 308	1 480 134
Nykyiset kustannukset	936 571	1 032 092	836 997	846 987	1 559 280
Polttoainekustannukset +10 %	996 403	1 101 475	882 747	877 665	1 638 427
Polttoainekustannukset +20 %	1 056 235	1 170 859	928 497	908 344	1 717 574

Taulukko 14. Polttoainekustannusten muutosten vaikutukset puoliperävaunuyhdistelmien elinkaarikustannuksiin.

Taulukossa 14 on eritelty polttoainekustannusten muutosten vaikutukset puoliperävaunuyhdistelmien elinkaarikustannuksiin. Kustannuksia vertailtaessa havaitaan, että polttoainekustannusten osuus vaikuttaa suoraan siihen, kuinka herkästi ne reagoivat muuttuneisiin kustannuksiin. Koska polttoainekustannukset muodostavat useimmissa ajoneuvotyypeissä suurimman osan kustannuksista, on kustannusten muutoksilla huomattava vaikutus niiden elinkaarikustannuksiin. Kymmenen prosentin muutos dieselin hinnassa vaikuttaa ajoneuvon elinkaarikustannuksiin noin 60 000 euroa. HVO-dieselin kohdalla vastaava kustannusvaikutus on 69 000 euroa, biometaanin 46 000 euroa, sähköön 31 000 euroa ja polttokennossa käytettävän vedyn 80 000 euroa. Taulukon ääripäässä olevien kustannusten ero huomattava, sillä sähköisellä ajoneuvollakin 20 prosentin lasku energian hinnassa johtaa 15,6 prosenttia alhaisempiin elinkaarikustannuksiin kuin sellaisessa skenaariossa, jossa energian hinta nousee 20 prosenttia. Muilla käyttövoimilla vastaavat kustannuserot kasvavat yli 20 prosenttiin, ja HVO-dieselin kohdalla kustannusero edullisimman ja kallemman skenaarion välillä on lähes 31 prosenttia.

Käyttövoima	Diesel	HVO-diesel	Biometaani	Sähkö	Polttokenno
Polttoainekustannukset -20 %	1 228 866	1 350 582	1 104 539	1 186 984	1 985 840
Polttoainekustannukset -10 %	1 324 192	1 461 122	1 177 426	1 246 597	2 110 824
Nykyiset kustannukset	1 419 517	1 571 662	1 250 314	1 306 211	2 235 807
Polttoainekustannukset +10 %	1 514 843	1 682 202	1 323 201	1 365 825	2 360 791
Polttoainekustannukset +20 %	1 610 168	1 792 742	1 396 088	1 425 438	2 485 775

Taulukko 15. Polttoainekustannusten muutosten vaikutukset täysperävaunuyhdistelmien elinkaarikustannuksiin.

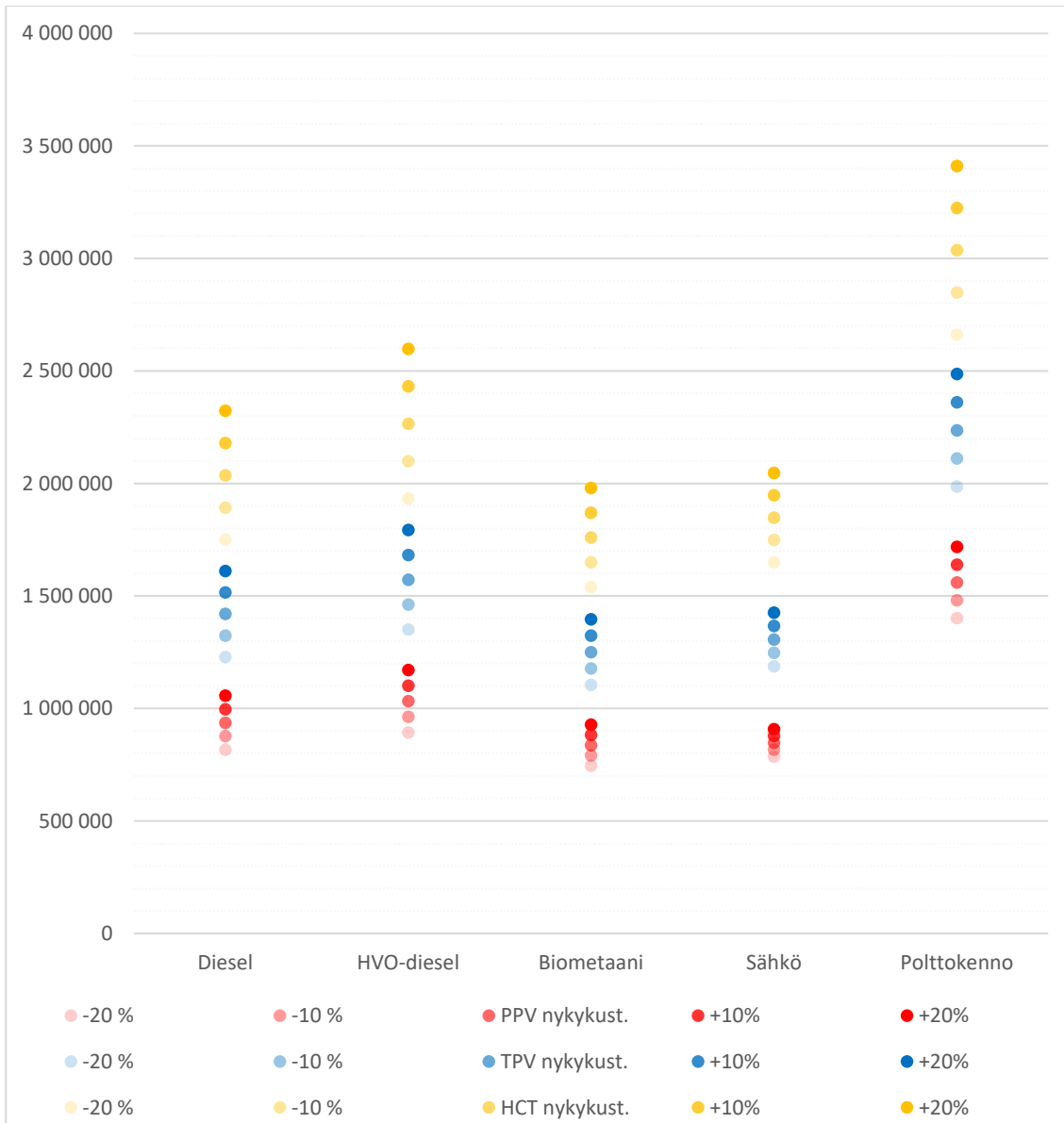
Taulukko 15 sisältää polttoainekustannusten vaikutuksen täysperävaunuyhdistelmien kokonaiskustannuksiin. Täysperävaunuyhdistelmissä polttoaineen muutos vaikuttaa

suurempien polttoainekustannusten myötä elinkaarikustannuksiin huomattavasti puolipe-
rävaunuyhdistelmiä enemmän. Esimerkiksi kymmenen prosentin muutos sähkön hin-
nassa vaikuttaa sähköajoneuvojen elinkaarikustannuksiin 60 000 euroa, dieselajoneuvo-
jen kohdalla eron ollessa 95 000 euroa ja vetyajoneuvoilla jopa 125 000 euroa. Elinkaa-
rikustannusten ero polttoainekustannusten ääripäissä on sähköllä 20 prosenttia, vedyllä
25 prosenttia, biometaanilla 26 prosenttia, dieselillä 31 ja HVO-dieselillä 33 prosenttia.

Käyttövoima	Diesel	HVO-diesel	Biometaan	Sähkö	Polttokenno
Polttoainekustannukset -20 %	1 749 394	1 932 620	1 539 854	1 649 787	2 660 843
Polttoainekustannukset -10 %	1 892 899	2 099 029	1 649 580	1 748 905	2 848 408
Nykyiset kustannukset	2 036 404	2 265 437	1 759 305	1 848 023	3 035 973
Polttoainekustannukset +10 %	2 179 909	2 431 846	1 869 031	1 947 142	3 223 537
Polttoainekustannukset +20 %	2 323 415	2 598 254	1 978 757	2 046 260	3 411 102

Taulukko 16. Polttoainekustannusten muutosten vaikutukset HCT-yhdistelmien elinkaarikustannuksiin.

Taulukko 16 sisältää polttoainekustannukset HCT-yhdistelmien osalta. Polttoainekustannusten osuus kokonaiskustannuksista on edelleen korkeampi aiempiin ajoneuvotyyppisiin verrattuna, ja samalla kymmenen prosentin muutos polttoaineen hinnassa johtaa sähköisissäkin ajoneuvoissa jo 100 000 euron kustannusvaikutukseen. Biometaanin hinnanmuutoksen vaikutus on 110 000 euroa, ja dieselin kohdalla 10 prosentin muutos merkitsee jo 144 000 euron erotusta. Prosentuaalinen elinkaarikustannusten muutos äärihintojen välillä vaihtelee sähkön 24 prosentista HVO-dieselin 34 prosenttiin.



Kuva 15. Polttoainekustannusten muutosten vaikutukset (-20 %, -10 %, 0 %, +10 % ja +20 %) ajoneuvoyhdistelmien elinkaarikustannuksiin. Puoliperävaunuyhdistelmät on merkitty punaisella, täysperävaunuyhdistelmä sinisellä ja HCT-yhdistelmät oranssilla.

Kuvassa 15 on koottuna yhteen kaikkien ajoneuvotyyppien ja käyttövoimien elinkaarikustannukset. Kuvasta on selkeästi havaittavissa kuinka mahdolliset muutokset energianhinnassa voivat vaikuttaa ajoneuvojen kustannuskilpailukykyyn verrattuna muihin käyttövoimiin. Vaikka biometaani ja sähkö ovat kaikissa ajoneuvotyypeissä selkeästi muita vaihtoehtoja edullisempia, muutokset energian hinnoissa voivat kääntää kustannusedun dieselin ohella jopa HVO-dieselin eduksi. Koska energian hintojen vaihtelut saattavat olla nopeita, elinkaarikustannusten ja käyttövoimien kilpailukyvyyn arviointi voi olla erittäin

haasteellista. Käyttövoimista ainoastaan polttonennoajoneuvot erottautuvat selkeästi joukosta, sillä niiden kustannukset ovat kaikissa ajoneuvotyypeissä huomattavasti muita vaihtoehtoja korkeammat.

9 Käyttöpotentiaali

Ajoneuvojen elinkaarikustannusten lisäksi on tärkeää varmistaa niiden edellytykset suoriutua tarvittavista kuljetuksista. Suomessa ilmasto-olosuhteet ja 76 tonnia painavat ajoneuvot mahdollistava lainsäädäntö tuovat käyttövoimille erityisiä haasteita. Tässä luvussa tehtävässä käyttöpotentiaalin tarkastelussa ajoneuvojen odotetaan suoriutuvan luvussa 6.1 määritellyistä päivittäisistä ajomatkoista ajoneuvotyypeille. Puoliperävaunuyhdistelmien päivittäiseksi suoritteeksi on määritelty 388 kilometriä, täysperävaunuyhdistelmän 484 kilometriä ja HCT-yhdistelmän 659 kilometriä. Ajoneuvotyypeiltä edellytettävä suorite kasvaa näin ollen samalla kun niiden kulutus kasvaa kokonaismassan lisääntyessä.

9.1 Polttomoottoriajoneuvot

Dieselajoneuvojen polttoainetankin vetoisuutena tutkielmassa käytetään 1510 litraa (Volvo Trucks 2025), ja kaasukäyttöisen ajoneuvon kapasiteetiksi arvioidaan 390 kilogrammaa nestemäistä biometaania (Iveco 2022b). Polttomoottoriajoneuvoissa polttoainetankkien kapasiteetti riittää kattamaan päivittäisen kapasiteetin kokonaan ilman tankkausta (taulukko 17). Talvella diesel- ja HVO-dieselkäyttöiset HCT-yhdistelmät kuluttavat ainoastaan noin kolmasosatankillisen polttoainetta. Nestemäisellä biometaanilla kulkeva HCT-yhdistelmä kykenee myös suoriutumaan päivittäisestä ajosta ilman tankkausta. Talvikaudella kuitenkin päivän aikana kuluu lähes 95 prosenttia täydestä polttoainetankista.

	Diesel					
	Puolip.yhd.		Täysp.yhd.		HCT-yhd.	
Käyttövoima						
Ajoneuvotyyppi						
Massa	42 t	42 t	64 t	64 t	76 t	76 t
Vuodenaika	Kesä	Talvi	Kesä	Talvi	Kesä	Talvi
Kilometrit/päivä	388	388	484	484	659	659
Kulutus l/100 km	43,03	51,85	54,66	66,66	60,47	73,87
Kulutus/päivä (l)	166,78	200,98	264,81	322,95	398,45	486,77
Kapasiteetti (l)	1510	1510	1510	1510	1510	1510

	HVO-diesel					
	Puolip.yhd.		Täysp.yhd.		HCT-yhd.	
Käyttövoima						
Ajoneuvotyyppi						
Massa	42 t	42 t	64 t	64 t	76 t	76 t
Vuodenaika	Kesä	Talvi	Kesä	Talvi	Kesä	Talvi
Kilometrit/päivä	388	388	484	484	659	659
Kulutus l/100 km	44,32	52,62	56,30	67,64	62,28	74,97
Kulutus/päivä (l)	171,78	203,95	272,75	327,72	410,40	493,96
Kapasiteetti (l)	1510	1510	1510	1510	1510	1510

	Biometaani					
	Puolip.yhd.		Täysp.yhd.		HCT-yhd.	
Käyttövoima						
Ajoneuvotyyppi						
Massa	42 t	42 t	64 t	64 t	76 t	76 t
Vuodenaika	Kesä	Talvi	Kesä	Talvi	Kesä	Talvi
Kilometrit/päivä	388	388	484	484	659	659
Kulutus kg/100 km	33,04	39,23	41,97	50,43	46,43	55,89
Kulutus/päivä (kg)	128,07	152,05	203,34	244,32	305,96	368,26
Kapasiteetti (kg)	390	390	390	390	390	390

Taulukko 17. Polttomoottoriajoneuvojen päivittäinen polttoaineenkulutus.

9.2 Sähkömoottoriajoneuvot

9.2.1 Sähkö

Sähköisten ajoneuvojen käyttöpotentiaaliin liittyy erityisiä haasteita, sillä ne poikkeavat huomattavasti muista ajoneuvoista mm. rajoitetun toimintasäteen ja pitkien latausaikojen takia (Alonso-Villar ym. 2023). Näin ollen akkujen kapasiteetin kasvattaminen ja suurempi latausnopeus vaikuttavat merkittävästi raskaiden sähköisten ajoneuvojen käytettävyyteen. Mikäli näistä vähintään toista saadaan kasvatettua, ajoneuvon käyttöpotentiaali paranee (Jahangir Samet ym. 2024). Edellä mainituista erityisesti latauksen nopeudella on nähty aiemmissa tutkimuksissa huomattava merkitys raskaiden ajoneuvojen

kokonaiskustannuksille, sillä alhaiset latausnopeudet edellyttävät joko suurempien akkujen käyttöä (Teichert ym. 2023) tai pidempää päivittäistä työaikaa (Nykvist & Olsson 2021).

Tässä tutkimuksessa on arvioitu eri ajoneuvotyyppien edellyttämät päivittäiset latauserrat 400 kilowatin ja 1 megawatin latausnopeuksilla. 400 kilowatin teholla toimivia latausasemia Suomessa markkinoilla nykyisin mm. Nesteen ja ABC:n liikenneasemien yhteydessä (Neste 2024b; Kempower 2024). Megawatin latausnopeus perustuu puolestaan kehitteillä olevaan raskaan liikenteen yhteiseen latausstandardiin (CharIN 2022). Lataus-
tauon kestoksi on määritelty EU:n alueella kuljetusalalla käytettävä 45 minuutin lepoaika 4,5 ajotunnin jälkeen. Tätä pidempi latausaika kasvattaa päivittäistä ajoaikaa ja kuljetuksen kustannuksia. Tutkimuksessa ajoneuvon latausnopeudeksi on määritelty latausase-
man nimellisteho, mutta käytännössä ajoneuvon vastaanottama määrä on yleensä tätä al-
haisempi. 45 minuutin lepoajan aikana 400 kilowatin latausasema lisää akun varausta 300
kilowattituntia eli noin 41 prosenttia kapasiteetista. Yhden megawatin latausasema on sen
sijaan riittävän tehokas 728 kilowattitunnin akuston lataamiseen täyteen varaukseen, sillä
akun varaaminen täyteen 45 minuutissa edellyttää latausasemalta 970 kilowatin tehoa.

Käyttövoima Ajoneuvotyyppi	Sähkö					
	Puolip.yhd.		Täysp.yhd.		HCT-yhd.	
Massa	42 t	42 t	64 t	64 t	76 t	76 t
Vuodenaika	Kesä	Talvi	Kesä	Talvi	Kesä	Talvi
Kilometrit/päivä	388	388	484	484	659	659
Kulutus kWh/100 km	196,72	238,17	247,31	304,51	272,38	337,57
Kulutus/päivä (kWh)	762,48	923,14	1198,21	1475,34	1794,75	2224,30
Kapasiteetti (kWh)	728	728	728	728	728	728
Toimintasäde (km)	370	306	294	239	267	216
Lataus 45 min 400 kW	300	300	300	300	300	300
Latausten määrä	1	1	2	3	4	5
Lataus 45 min 1 MW	728	728	728	728	728	728
Latausten määrä	1	1	1	2	2	3

Taulukko 18. Akkukäyttöisen sähköajoneuvon päivittäinen energian kulutus ja tarvittavien lataus-
ten määrät.

Taulukko 18 osoittaa, että puoliperävaunuyhdistelmillä voidaan saavuttaa kesäolosuhteissa 370 kilometrin, täysperävaunuyhdistelmillä 294 kilometrin ja HCT-yhdistelmillä 276 kilometrin toimintasäde ilman latausta.

Ilman alhainen lämpötila voi heikentää merkittävästi sähköisen ajoneuvon toimintasädetä, ja VECTO-työkalulla tehdyt simulaatiot osoittivat sähköisen ajoneuvon toimintasäteen laskevan talvella 21–24 prosenttia -7 celsiusasteen lämpötilassa. Saadut tulokset osoittavat jonkin verran suurempaa suhteellista energiakulutuksen kasvua kuin aikaisemmat tutkimukset: Alonso-Villar ym. (2023) arvioivat puoliperävaunuyhdistelmän toimintasäteen laskevan -7 celsiusasteen lämpötilassa 15 prosenttia ja Basma ym. (2021a) määrittivät toimintasäteen heikkenevän -7 celsiusasteen lämpötilassa 3–9 prosenttia. Tol ym. (2022) taas arvioivat sähköisen ajoneuvon kapasiteetin laskevan -7 celsiusasteen lämpötilassa noin 5,5 prosenttia.

Absoluuttisia kulutusmääriä tarkastellessa sähköisen puoliperävaunuyhdistelmän simuloiduksi toimintasäteeksi saatiin talvella 728 kWh:n akustolla 306 kilometriä, jolloin kulutus jää kuitenkin hieman alhaisemmaksi kuin Alonso-Villarin ym. (2022) tekemässä tarkastelussa, jossa he arvioivat 300 kilometrin ajosäteen edellyttävän 40-tonnisella ajoneuvolla 784 kWh:n akustoa talvisissa olosuhteissa. Toisaalta taas Rajalehto ja Helo (2025) arvioivat kulutusdataan pohjautuen, että Suomen sääolosuhteissa 64 tonnin yhdistelmäajoneuvoillakin voitaisiin päästä keskimäärin jopa 393 kilometrin toimintasäteeseen.

Sähköiset kuorma-autot ovat Suomessa yleistyneet nopeasti paikalliseen jakeluun keskitetyissä kuljetuksissa, joissa päivittäinen ajomatka jää useimmiten 150 kilometriin, jolloin akun kapasiteetti riittää koko päivän ajaksi (Viinikainen ym. 2023). Taulukko 18 osoittaa, että sähköisten akkukäyttöisten ajoneuvojen toimintasäde riittää Suomen olosuhteissa myös puoliperävaunuyhdistelmien tarpeisiin jo 400 kilowatin latausteholla. Täysperävaunuyhdistelmien käyttöpotentiaaliin ajoneuvojen latausnopeudella havaittiin puolestaan olevan merkittävä vaikutus. Mikäli käytössä on alhaisempi 400 kilowatin pikalatausteho, se edellyttää kesäolosuhteissa yhtä ja talviolosuhteissa kahta ylimääräistä pysähdystä latausta varten. Sen sijaan yhden megawatin latausteho mahdollistaisi täysperävaunuyhdistelmän liikennöinnin lähes rajoitteitta, sillä ajoneuvolle riittäisi talvikausina tehtävä vajaan kahden minuutin mittainen ylimääräinen pysähdys riittävän varaustason saavuttamiseksi. Sähköiset akkukäyttöiset HCT-yhdistelmät kohtaavat sen sijaan merkittäviä

haasteita 659 kilometrin päivittäisestä ajomatkasta suoriutumiseen. Sähköisen HCT-yhdistelmän käyttö edellyttäisi 400 kilowatin latausteholla kesäkaudella kolmea ja talvikaudella neljää ylimääräistä pysähdystä, jolloin lataustauot kasvattaisivat päivittäistä työaikaa talvella jopa kolmella tunnilla. Yhden megawatin latausnopeudella HCT-ajoneuvoilla tulisi tehdä kesäisin yksi ja talvisin kaksi ylimääräistä päivittäistä pysähdystä, jolloin ylimääräiseksi työajaksi muodostuisi kesäisin 28 minuuttia ja talvisin 48 minuuttia.

9.2.2 Polttokenno

Polttokennoajoneuvojen vetytankin kooksi on tutkielmassa määritetty Ivecon (2023) mukaisesti 70 kilogrammaa. Ajoneuvon toimintasäde on puoliperävaunuyhdistelmillä talvisin 539 kilometriä, täysperävaunuyhdistelmillä 421 kilometriä ja HCT-yhdistelmillä 380 kilometriä (taulukko 19). Polttokenno mahdollistaa puoliperävaunuyhdistelmän operoinnin Suomen olosuhteissa ilman ylimääräistä tankkausta. Täysperä- ja HCT-yhdistelmillekin riittää yksi päivittäinen tankkaus, jolloin polttokennokäyttöisille yhdistelmille ei synny teknologian käytöstä rajoitetta.

Käyttövoima Ajoneuvotyyppi	Polttokenno					
	Puolip.yhd.		Täysp.yhd.		HCT-yhd.	
Massa	42 t	42 t	64 t	64 t	76 t	76 t
Vuodenaika	Kesä	Talvi	Kesä	Talvi	Kesä	Talvi
Kilometrit/päivä	388	388	484	484	659	659
Kulutus kg/100 km	10,73	12,99	13,49	16,61	14,86	18,41
Kulutus/päivä (kg)	41,59	50,35	65,36	80,47	97,90	121,31
Kapasiteetti (kg)	70	70	70	70	70	70
Toimintasäde (km)	652	539	519	421	471	380
Tankkausten määrä	0	0	0	1	1	1

Taulukko 19. Polttokennokäyttöisen sähköajoneuvon päivittäinen energiankulutus ja tarvittavien tankkausten määrät.

Saatu puoliperävaunuyhdistelmän toimintasäde vastaa Alonso-Villarin (2022) tutkimustulosta, jonka mukaan 40 tonnin painoinen yhdistelmä voisi saavuttaa talvisissa olosuhteissa 500 kilometrin toimintasäteen 64 kilogramman vetyvarastolla.

9.3 Sähköisen ajoneuvon energiatehokkuuden vaikutus käyttöpotentiaaliin

Akun energiatehokkuuden parantaminen mahdollistaa ajoneuvojen toimintasäteen kasvattamisen kustannustehokkaasti. Suurempi latausteho ja akun koko edesauttavat myös toimintasäteen kasvattamisessa, mutta ne kasvattavat lisäksi ajoneuvon kustannuksia. Mikäli ajoneuvon akun kokoa kasvatettaisiin pidemmän toimintamatkan saavuttamiseksi tai kylmän sään aiheuttaman toimintasäteen laskun kompensoimiseksi, ajoneuvon hankintakustannukset kasvaisivat, mikä heikentäisi ajoneuvojen kustannustehokkuutta ja kilpailukykyä muihin käyttövoimiin verrattuna (Basma ym. 2021a). Samalla suurempi akku heikentäisi ajoneuvon hyötykapasiteettia (Rout ym. 2022). Toisaalta akun koko on aina tietynlainen kompromissi, sillä sen on oltava tarpeeksi suuri tehokkaan kuljetustoiminnan takaamiseksi. Korkeamman hankintahinnan vastapainona suurempi akku mahdollistaa hitaamman ja näin ollen edullisemmän sähkön käytön (Schneider ym. 2023).

Sähköisten ajoneuvojen energiatehokkuuden arvioidaan paranevan noin 20 prosenttia tämän vuosikymmenen aikana (Transport & Environment 2022). Energiatehokkuutta arvioidessa on tärkeää huomioida myös aerodynamiikan vaikutus ajoneuvojen kulutuksen. Tässä tutkimuksessa käytetty, EU:n asetuksessa (EU) 2017/2400 määritelty ilmanvastusarvo $8,5 C_{DA}$ raskaille ajoneuvoille on huomattavasti korkeampi kuin esimerkiksi Hari-ramin ym. (2019) arvioima ilmanvastusarvo $5,21 C_{DA}$ ilmanohjaimilla varustetulle puoliperävaunuyhdistelmälle. Jälkimmäisellä ilmanvastuskertoimella 42 tonnin sähköisen ajoneuvon kulutus laskisi VECTO-simulaation perusteella yli 15 prosenttia.

Käyttövoima Ajoneuvotyyppi	Sähkö					
	Puolip.yhd.		Täysp.yhd.		HCT-yhd.	
Massa	42 t	42 t	64 t	64 t	76 t	76 t
Vuodenaika	Kesä	Talvi	Kesä	Talvi	Kesä	Talvi
Kilometrit/päivä	388	388	484	484	659	659
Kapasiteetti kWh	728	728	728	728	728	728
Kulutus (kWh)/100 km	196,72	238,17	247,31	304,51	272,38	337,57
Kulutus -5 %	186,88	226,26	234,94	289,28	258,76	320,69
Kulutus -10 %	177,05	214,35	222,58	274,06	245,14	303,81
Kulutus -15 %	167,21	202,44	210,21	258,83	231,52	286,93
Kulutus -20 %	157,38	190,54	197,85	243,61	217,90	270,06
Kulutus (kWh/päivä)	762,48	923,14	1198,21	1475,34	1794,75	2224,30
Kulutus -5 %	724,36	876,98	1138,30	1401,57	1705,01	2113,08
Kulutus -10 %	686,23	830,83	1078,39	1327,81	1615,28	2001,87
Kulutus -15 %	648,11	784,67	1018,48	1254,04	1525,54	1890,65
Kulutus -20 %	609,98	738,51	958,57	1180,27	1435,80	1779,44
Latausten määrä 1MW	1	1	1	2	2	3
Kulutus -5 %	0	1	1	1	2	2
Kulutus -10 %	0	1	1	1	2	2
Kulutus -15 %	0	1	1	1	2	2
Kulutus -20 %	0	1	1	1	1	2
Hitaan latauksen osuus	0,95	0,79	0,61	0,49	0,41	0,33
Kulutus -5 %	1,00	0,83	0,64	0,52	0,43	0,34
Kulutus -10 %	1,00	0,88	0,68	0,55	0,45	0,36
Kulutus -15 %	1,00	0,93	0,71	0,58	0,48	0,39
Kulutus -20 %	1,00	0,99	0,76	0,62	0,51	0,41

Taulukko 20. Energiatohokkuuden paranemisen vaikutukset ajoneuvojen kulutus- ja latausmääriin.

Taulukossa 20 on eritelty, kuinka kulutuksen väheneminen vaikuttaa sähköisten ajoneuvojen kulutus- ja latausmääriin eri ajoneuvotyypeillä eri vuodenaikoina yhden megawatin latausnopeudella. Taulukosta voidaan havaita, kuinka ajoneuvojen energiatohokkuuden parantaminen laskee ajoneuvon kokonaiskulutusta ja samalla nostaa hitaan latauksen osuutta käytetystä kokonaisenergiasta.

Puoliperävaunuyhdistelmissä viiden prosentin parannus energiatohokkuudessa mahdollistaa ajoneuvon liikennöinnin ilman lataustaukoa työpäivän aikana kesällä, kun taas talvisissa olosuhteissa energiatohokkuuden tulisi parantua yli 20 prosenttia. Täysperävaunuyhdistelmissä ajoneuvojen kahden minuutin ylimääräinen lataus talviaikaan olisi vältettävissä 1,3 prosentin parannuksella ajoneuvon energiatohokkuuteen. Toisaalta merkittäväkään energiatohokkuuden parannus ei mahdollistaisi suoriutumista ilman tauolla

tehtävää latausta, sillä 20 prosenttia alhaisemmalla kulutuksellakin neljännes päivän aikana käytettävästä energiasta tulisi ladata pikalatauksella, vaikka hitaan latauksen osuus kokonaismäärästä kasvaakin 13 prosenttiyksikköä nykytilanteeseen verrattuna.

HCT-yhdistelmissä taloudellisuuden paraneminen 20 prosentilla on edellytys sille, että ajoneuvot voisivat suoriutua 659 kilometrin päivittäisestä suoritteesta yhdellä latauksella ja samalla ilman käyttövoiman tuomaa haittaa kuljetusten aikataululle. Yhden latauksen työpäivä on kuitenkin saavutettavissa ainoastaan kesällä, ja silloinkin ajoneuvon lataus tulisi saada optimoitua ajankohtaan, jolloin ajoneuvon varauksesta on enää prosentti jäljellä.

Käyttövoima Ajoneuvotyyppi	Sähkö					
	Puolip.yhd.		Täysp.yhd.		HCT-yhd.	
Massa	42 t	42 t	64 t	64 t	76 t	76 t
Vuodenaika	Kesä	Talvi	Kesä	Talvi	Kesä	Talvi
Kilometrit/päivä	388	388	484	484	659	659
Kapasiteetti (kWh)	728	728	728	728	728	728
Latauskustannukset vuodessa	35 858		69 679		115 853	
Kulutus -5 %	33 023		65 068		108 934	
Kulutus -10 %	30 988		60 457		102 014	
Kulutus -15 %	28 954		55 846		95 094	
Kulutus -20 %	26 919		51 235		88 175	
Latauskustannusten muutos (%)	0 %		0 %		0 %	
Kulutus -5 %	- 8 %		- 7 %		- 6 %	
Kulutus -10 %	- 14 %		- 13 %		- 12 %	
Kulutus -15 %	- 19 %		- 20 %		- 18 %	
Kulutus -20 %	- 25 %		- 26 %		- 24 %	
Latauskustannukset yhteensä	306 787		596 136		991 182	
Kulutus -5 %	282 530		556 688		931 982	
Kulutus -10 %	265 122		517 239		872 781	
Kulutus -15 %	247 715		477 791		813 580	
Kulutus -20 %	230 308		438 343		754 379	
Ajoneuvon elinkaarikustannukset	846 987		1 306 211		1 848 023	
Kulutus -5 %	822 730		1 266 763		1 788 823	
Kulutus -10 %	805 322		1 227 314		1 729 622	
Kulutus -15 %	787 915		1 187 866		1 670 421	
Kulutus -20 %	770 508		1 148 417		1 611 221	

Taulukko 21. Energiatehokkuuden paranemisen vaikutukset ajoneuvojen kustannuksiin.

Taulukko 21 esittää, millä tavoin kulutuksen väheneminen vaikuttaa ajoneuvon kustannuksiin. Kustannusten osalta on huomioitavaa, että latauskustannukset laskevat kaikilla

ajoneuvotyypeillä kulutuslukemia enemmän, sillä kuten yllä mainittiin, alhaisemman kokonaisenergian kulutuksen lisäksi latauskustannukset kilowattituntia kohti laskevat hitaan latauksen osuuden noustessa. Energiatohokkuuden kasvaessa 5–10 prosenttia merkittävin suhteellinen kustannushyöty saavutetaan puoliperävaunuyhdistelmillä, mutta tehokkuuden kasvaessa 15–20 prosenttia suhteelliset kustannukset laskevat eniten täysperävaunuyhdistelmissä, joiden osalta latauskustannukset voivat laskea jopa 26 prosenttia. Lisäksi saadut kustannussäästöt laskevat suhteellisesti enemmän täysperävaunuyhdistelmien kuin puoliperävaunuyhdistelmien kustannuksia, sillä polttoainekustannukset muodostavat niiden kokonaiskustannuksista suuremman osan kuin puoliperävaunuyhdistelmissä.

Puoliperävaunuyhdistelmissä energiakulutuksen väheneminen viidellä prosentilla leikkaisi sähköisen ajoneuvon kustannuksia siten, että elinkaarikustannukset olisivat muita käyttövoimia edullisemmat (822 730 euroa vrt. biometaanin 836 997 euroa). Täysperävaunuyhdistelmissä ajoneuvojen kulutuksen tulisi suuremmista kustannushyödyistä huolimatta laskea yli kymmenen prosenttia, jotta biometaanin elinkaarikustannukset (1,250 milj. euroa) alittuisivat.

Sähköisten HCT-yhdistelmien osalta on huomioitava, että niiden elinkaarikustannukset eivät ole suoraan vertailukelpoisia muiden käyttövoimien kanssa, sillä HCT-yhdistelmien operoiminen akkukäyttöisillä ajoneuvoilla edellyttäisi ylimääräisten latausten myötä pidempää päivittäistä työaika kasvattaen mm. työntekijäkustannuksia.

10 Johtopäätökset

EU on asettanut tavoitteekseen vähentää kasvihuonekaasupäästöt nollatasolle vuoteen 2050 mennessä (Euroopan komissio 2019). Päästöjen vähentäminen on osoittautunut haasteelliseksi erityisesti raskaassa liikenteessä. Koska raskaan liikenteen määrän odotetaan kasvavan huomattavasti tulevina vuosikymmeninä, toimenpiteet päästöjen vähentämiseksi ovat erittäin tärkeitä. Mikäli EU:n alueella halutaan saavuttaa hiilineutraalius vuoteen 2050 mennessä, myös raskaan liikenteen tulee perustua täysin päästöttömiin ajoneuvoihin. Jos ajoneuvojen toimintaiäksi raskaissa ajoneuvoissa arvioidaan 15 vuotta, kaikkien myytyjen ajoneuvojen tulisi olla päästöttömiä vuoteen 2035 mennessä.

Kasvihuonepäästöjen leikkaaminen koskee kaikkia sektoreita ja toimialoja. Tahtotila ja paine päästöjen vähentämiseksi on yhteinen, ja esimerkiksi yritykset pyrkivät vähentämään sekä tuotantonsa että tuotteidensa hiilijalanjälkeä. Samalla näiden yritysten toimitusketjujen vähäpäästöisyyteen tähtäävät toimenpiteet edellyttävät myös kuljetusyrityksiltä siirtymää dieselistä vähäpäästöisempiin käyttövoimiin (SKAL 2023a).

Liikenne tuottaa hiilidioksidipäästöjen lisäksi myös muita erilaisia terveydelle haitallisia päästöjä, kuten typen oksideja, hiilimonoksidia, ammoniakkia, haihtuvia orgaanisia yhdisteitä kuten metaania sekä pienhiukkasia (Suarez-Bertoa ym. 2020). Vaikka HVO-dieselin ja biometaanin myötä ajoneuvojen syntyviä laskennallisia hiilidioksidipäästöjä saataisiin laskettua, syntyy niiden käytöstä kuitenkin merkittävä määrä erilaisia päästöjä, jotka vaikuttavat asuinympäristöjemme ilmanlaatuun. Liikenteessä olisikin näin ollen tärkeää siirtyä täysin päästöttömiin käyttövoimiin, eli sähkömoottoriteknologiaan perustuviin akkukäyttöisiin sähköajoneuvoihin sekä polttokennoajoneuvoihin, joista jälkimmäisen on kirjallisuudessa arvioitu vastaavan erityisesti raskaan liikenteen tarpeisiin.

Uusiutuvista energialähteistä tuotetun sähkön tuotannon tulisi kasvaa merkittävästi kokonaispäästöjen vähentämiseksi. Samalla myös sähkön jakelussa käytettävän infrastruktuurin pitäisi olla huomattavasti nykyistä kattavampi. Mikäli suunnitelmat vedyn käytöstä eri sektoreilla toteutuvat, syntyisi huomattava tarve energiantuotannon määrän kasvulle ja vedyn tuotanto kilpailisi uusiutuvasta sähköstä mm. teollisuuden, liikenteen ja lämmityksen kanssa (Brändle ym. 2021). Vedyn käyttö vaatisi suoraa sähköistystä enemmän energiaa: esimerkiksi Alonso-Villar ym. (2023) arvioivat vedyllä kulkevien ajoneuvojen

sähköntarpeen olevan 2,15-kertainen akkukäyttöisten sähköajoneuvojen kulutukseen verrattuna.

Siinä missä useimmissa Euroopan maissa raskaassa liikenteessä on sallittu korkeintaan 15,65 metrin ja 40 tonnin puoliperävaunuyhdistelmät, Suomessa sallitaan liikenteessä jopa 34,5 metriä pitkät 76 tonnin HCT-yhdistelmät. Tämä tuo yhdessä kylmien olosuhteiden ja pitkien etäisyyksien kanssa muuhun maailman verrattuna täysin omanlaisia haasteita erityisesti raskaiden kuljetusten sähköistämiseen. Tässä tutkimuksessa arvioitiin ajoneuvotyypeittäin eri käyttövoimien elinkaarikustannuksia luodun kustannuslaskentamallin avulla. Mallissa huomioitiin ajoneuvojen hankintakustannukset ja jäännösarvo sekä polttoaineesta, huolloista ja vakuutuksista syntyvät käyttökustannukset puoliperävaunu-, täysperävaunu- sekä HCT-yhdistelmille. Ajoneuvokohtaiset polttoaineiden kulutukset määriteltiin VECTO-simulaatiotyökalulla, jolloin kaikille ajoneuvotyypeille saatiin määriteltyä tarkat kulutuslukemat.

Elinkaarikustannusten vertailu osoittaa, että biometani on edullisin käyttövoima kaikkien ajoneuvotyyppien osalta. Sähköisten akkukäyttöisten puoliperävaunuyhdistelmien elinkaarikustannukset ovat 1,5 prosenttia, täysperävaunuyhdistelmien 4,5 prosenttia ja HCT-yhdistelmien 5 prosenttia biometania korkeammat. Kustannuseron kasvu selittyy pääasiassa pikalatauksen osuuden kasvulla ajoneuvojen massan noustessa, sillä pikalatauksella ladatun sähköisen ajoneuvon käyttökustannukset osoittautuvat jopa hieman biometania korkeammaksi. Kustannusvertailu kuitenkin osoittaa, että nollapäästöisillä sähköisillä raskailla ajoneuvoilla päästään jo nykytilanteessa dieseliä alhaisempiin elinkaarikustannuksiin. Sähköisten ajoneuvojen hankintakustannusten odotetaan teknologisen kehityksen myötä laskevan edelleen, mikä parantaisi entisestään sähköisten ajoneuvojen kustannuskilpailukykyä. Polttokennoajoneuvojen käyttökustannukset ovat merkittävästi kaikkia muita käyttövoimia korkeammat. Vaikka vetykäyttöisten ajoneuvojen kilpailukyvyn odotetaan paranevan kustannusten laskiessa (Rout ym. 2022), vihreä vety on niin kustannuksiltaan kuin teknologisiltaan valmiuksiltaan yhä selvästi jäljessä muihin käyttövoimiin verrattuna.

Suomalaisten kuljetusyritysten mukaan yhteiskunnan tuki on tärkeää sekä ajoneuvojen hankinnassa että infrastruktuurin luomisessa vaihtoehtoisten käyttövoimien määrän kasvattamiseksi (Viinikainen ym. 2023). Ajoneuvokustannusten herkkyytarkastelu osoittaa, että akkukäyttöiset sähköiset ajoneuvot ovat muita käyttövoimia herkempiä hinnan

muutoksille. Näin ollen ajoneuvon hankintahinnan lasku teknologian kehityksen tai hankintatukien muodossa vaikuttaa sähkökäyttöisiin ajoneuvoihin muita käyttövoimia voimakkaammin. Suomessa toimivista tavarakuljetusalan yrityksistä noin 80 prosenttia on 1–3 auton yrityksiä (Traficom 2025), joilla on isoja yrityksiä suurempia haasteita sitoa ajoneuvoihin sähköisten ajoneuvojen edellyttämää pääomaa. Hankintahintojen lasku mahdollistaisi näin ollen erityisesti pienten yritysten siirtymän päästöttömiin ajoneuvoihin.

Polttoaineiden hintojen osalta tehty herkkyystarkastelu vahvistaa mm. Alonso-Villarin (2022) havainnon, että siinä missä sähköiset ajoneuvot ovat herkkiä ajoneuvon hinnan muutoksille, muut käyttövoimat ovat herkempiä polttoaineiden hinnan muutoksille. Herkkyystarkastelu osoittaa, että energian hinta vaikuttaa merkittävästi ajoneuvojen kustannustasoon. Energian hinnan 20 prosentin vaihteluvälillä käyttövoimista niin diesel, HVO-diesel, biometaani kuin sähkökin voi osoittautua lopulta elinkaarikustannuksiltaan edullisimmaksi valinnaksi. Sähköiset ajoneuvot ovat vähemmän herkkiä polttoainekustannusten vaikutukselle, minkä ansiosta sähköisten ajoneuvojen elinkaarikustannukset ovat muihin käyttövoimiin verrattuna paremmin ennustettavissa (Rajalehto & Helo 2025). Tästä huolimatta energian hinta vaikuttaa merkittävästi myös sähköisten ajoneuvojen kustannuksiin erityisesti kokonaismassan ja kilometrisuoritteiden kasvaessa, ja näin ollen esimerkiksi pikalatausinfrastruktuurin tukeminen voisi alhaisempien latauskustannusten myötä parantaa entisestään sähköisten ajoneuvojen kilpailukykyä fossiiliin käyttövoimiin verrattuna.

Raskaiden ajoneuvojen käyttövoimia vertailtaessa on usein hyödyllistä verrata käyttövoiman vaikutusta ajoneuvon omamassaan ja arvioida kilometrikohtaisia kustannuksia todellisuudessa käytössä olevan hyötykapasiteetin mukaisesti (Magnino ym. 2024). Ajoneuvon massalla on merkitystä sellaisten tavaroiden kuljetuksissa, joissa massa muodostaa kapasiteettirajoitteen tilavuuden sijasta. Ajoneuvon massan vaikutus ajoneuvon kapasiteettiin ja edelleen kilometrikohtaisiin kustannuksiin on kuitenkin jätetty tämän tutkimuksen tarkastelun ulkopuolelle, sillä lainsäädäntö mahdollistaa puoliperävaunu- ja täysperävaunuyhdistelmissä vertailussa käytettyjä massoja suuremmat kokonaismassat. Useimmiten esimerkiksi kappaletavarakuljetuksissa tilavuus voi muodostua ensisijaiseksi rajoitteeksi painon sijaan, jonka myötä sähköä voimaanalähteenä käytävillä ajoneuvoilla voidaankin päästä vertailussa saatuja lukuja pidempiin toimintamatkoihin. Hyötykapasiteetin sisällyttäminen kustannuslaskentamalliin tulevissa tutkimuksissa voisi

tuoda osaltaan lisää arvokasta tietoa käyttövoimien tehokkaasta hyödyntämisestä Suomen raskaassa liikenteessä.

Toiminnalliset vaatimukset kuten ajoneuvon toimintamatka, lataus- ja tankkausajat sekä kuormakapasiteetti ovat myös tärkeitä kriteerejä siirryttäessä perinteisistä dieselkuorma-autoista nollapäästöisiin ajoneuvoihin (Tol ym. 2022). Siinä missä muille käyttövoimille Suomen kylmät sääolosuhteet, pitkät etäisyydet ja ajoneuvojen suuret massat eivät aiheuta ongelmia, akkujen rajallinen kapasiteetti tuo haasteensa erityisesti raskaimpiin kuljetuksiin. Liimatainen ym. (2019) arvioivat, että kuljetusalan sähköistäminen on erityisen hankalaa Suomessa, jossa pitkiä ja raskaita kuorma-autojen ja perävaunujen yhdistelmiä käytetään laajalti. He arvioivat, että Suomessa ainoastaan alle puolet tonnakilometreistä olisi ajettavissa sähköisillä ajoneuvoilla.

Tässä tutkimuksessa tehty sähköisten ajoneuvojen toimintaedellytysten tarkastelu kuitenkin osoittaa, että sähköiset puoliperävaunuyhdistelmät pystyvät jo nykyisellään suoriutumaan niiltä edellytettävistä suoritteista kaikkina vuodenaikoina, mikäli ne hyödyntävät 45 minuutin päivittäisellä tauolla 400 kilowatin pikalatausta. Myös täysperävaunuyhdistelmät pystyvät pienellä energiatehokkuuden parannuksella suoriutumaan kuljetuksista yhdellä päivittäisellä latauksella, mutta niiden käyttö edellyttää yhden megawatin pikalatausinfrastruktuuria. HCT-yhdistelmien osalta akkukäyttöinen teknologia osoittautuu riittämättömäksi, sillä ajoneuvojen tulisi käyttää päivittäin yli 45 minuuttia ylimääräisiin lataustaukoihin. Akkujen energiatehokkuuteen tehty herkkyystarkastelu osoittaa, että energiatehokkuuden kehitys ei merkittävästi muuta eri ajoneuvotyyppien käyttöpotentiaalia, vaikka se mahdollistaakin ajoneuvotyypeille lyhyemmät latausajat ja antaa samalla enemmän marginaalia latausten ajoittamiselle. On kuitenkin hyvä huomioida, että rajoitteista huolimatta sähköisten puoliperävaunuyhdistelmien toimintasäde on nykyiselläänkin myös talvisin riittävä liikennöinnille Helsingin ja Jyväskylän välillä. Sähköisen täysperävaunuyhdistelmän kantama riittää puolestaan Helsingistä Mikkeliin asti, ja HCT-yhdistelmänkin kantama ylittää liikennöintiin etelän suurimpien kaupunkikeskusten eli Helsingin, Turun ja Tampereen välillä.

Raskaan liikenteen päästöjen vähentäminen Suomessa on saatujen tulosten mukaisesti mahdollista vaihtoehtoisilla käyttövoimilla. Saatut tulokset osoittavat, että vaihtoehtoisista käyttövoimista biometaanin ja sähkön hyödyntäminen raskaassa liikenteessä on myös taloudellisesti kannattavaa. Sähkömoottoriajoneuvojen käyttöä edellyttävä täysin

nollapäästöinen liikenne on saavutettavissa, mutta se vaatii joko vetytalouden kehittymistä alan tavoitteiden mukaisesti tai akkukäyttöisten sähkökäyttöisten ajoneuvojen rajoitteiden hyväksymistä. Jälkimmäisessä tapauksessa kuljetusten järjestäminen edellyttäisi liikennöintiä nykyainsäädännön mahdollistamia maksimipainorajoja alhaisemmilla kokonaismassoilla. Vaikka raskaimpiin HCT-kuljetuksiin BEV-ajoneuvojen käyttöpotentiaali ei riitäkään, osoittavat tutkimuksessa saadut tulokset, että Suomessa kyettäisiin liikennöimään sähköisesti myös 64 tonnia painavilla täysperävaunuyhdistelmillä, mikä mahdollistaisi liikennöinnin jatkossakin noin 50 prosenttia suuremmilla kokonaismassoilla kuin kuljetuksissa voidaan käyttää muualla Euroopassa.

11 Lähdeluettelo

- ACEA (2020) Joint Statement. The transition to zero-emission road freight transport. ACEA.
- ACEA (2024a) New commercial vehicle registrations, European Union. Press release, ACEA. https://www.acea.auto/files/Press_release_commercial_vehicle_registrations_2023.pdf.
- ACEA (2024b) Vehicles on European Roads. <https://www.acea.auto/files/ACEA-Report-Vehicles-on-European-roads-.pdf>.
- Aguilar, P. – Groß, B. (2022) ”Battery electric vehicles and fuel cell electric vehicles, an analysis of alternative powertrains as a mean to decarbonise the transport sector.” *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102624>.
- Ahluwalia, R.K. – Roh, H.-S. – Peng, J.-K. – Papadias, D. – Baird, A.R. – Hecht, E.S. – Ehrhart, B.D. – Muna, A. – Ronevich, J.A. – Houchins, C. – Killingsworth, N.J. – Aceves, S.M. (2023) ”Liquid hydrogen storage system for heavy duty trucks: Configuration, performance, cost, and safety.” *International Journal of Hydrogen Energy*, 48: 13308–13323 <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.12.152>.
- Alamia, Alberto – Magnusson, Ingemar – Johnsson, Filip – Thunman, Henrik (2016) ”Well-to-wheel analysis of bio-methane via gasification, in heavy duty engines within the transport sector of the European Union.” *Applied Energy*, 170: 445–454.
- Al-Hanahi, Bassam – Ahmad, Iftekhar – Habibi, Daryoush – Masoum, Muhammed A.S. (2021) ”Charging Infrastructure for Commercial Electric Vehicles: Challenges and Future Works.” *IEEE Access*, 1–17.
- Alonso-Villar, Albert – Davíðsdóttir, Brynhildur – Stefánsson, Hlynur – Ásgeirsson, Eyjólfur Ingi – Kristjánsson, Ragnar (2022) ”Technical, economic, and environmental feasibility of alternative fuel heavy-duty vehicles in Iceland.” *Journal of Cleaner Production*, 1–15.
- Alonso-Villar, Albert – Davíðsdóttir, Brynhildur – Stefánsson, Hlynur – Ásgeirsson, Eyjólfur Ingi – Kristjánsson, Ragnar (2023) ”Electrification potential for heavy-

duty vehicles in harsh climate conditions: A case study based technical feasibility assessment.” *Journal of Cleaner Production*, 417.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137997>.

Anderhofstadt, Benedikt – Spinler, Stefan (2019) ”Factors affecting the purchasing decision and operation of alternative fuel-powered heavy-duty trucks in Germany – A Delphi study.” *Transportation Research Part D*, 73: 87–107.

<https://doi.org/10.1016/j.trd.2019.06.003>.

Anderhofstadt, Benedikt – Spinler, Stefan (2020) ”Preferences for autonomous and alternative fuel-powered heavy-duty trucks in Germany.” *Transportation Research Part D*, 79. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102232>.

Aravindan, M. – Madhan Kumar, V. – Hariharan, V.S. – Narahari, Tharun – Arun Kumar, P. – Madhesh, K. – Praveen Kumar, G. – Prabakaran, Rajendran (2023) ”Fuelling the future: A review of non-renewable hydrogen production and storage techniques.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 188: 1–23.

<https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113791>.

Basma, Hussein – Rodríguez, Felipe – Beys, Yannis (2021a) “Battery electric tractor-trailers in the European Union: A vehicle technology analysis. Working Paper, International Council on Clean Transportation. <https://theicct.org/sites/default/files/publications/eu-tractor-trailers-analysis-aug21.pdf>.

Basma, Hussein – Saboori, Arash – Rodríguez, Felipe (2021b) Total Cost of Ownership for Tractor Trailers in Europe: Battery versus Diesel. ICCT White Paper.

Basma, Hussein – Rodríguez, Felipe – Hildermeier, Julia – Jahn, Andreas (2022) Electrifying Last-Mile Delivery. Washington & Brussels: RAP & ICCT.

Basma, Hussein – Rodríguez, Felipe (2022) ”Fuel cell electric tractor-trailers: Technology overview and fuel economy.” Working Paper, The International Council on Clean Transportation: 1–32.

Bergqvist, Rickard – Monios, Jason – Jönsson, Jonathan (2023) ”Potential for rapid adoption of battery-electric heavy-duty trucks for pre- and post-haulage at intermodal terminals.” *Research in Transportation Business & Management*: 1–12.

<https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2023.101035>.

- Berkeley, Nigel – Bailey, David – Jones, Andrew – Jarvis, David (2017) "Assessing the transition towards Battery Electric Vehicles: A Multi-Level Perspective on drivers of, and barriers to, take up." *Transportation Research Part A*: 320–332.
- Berylls Strategy Advisors (2021) *Trucking on Hydrogen at Crossroads – Will the future be gaseous or Liquid?* München: Berylls.
- Bidart, Christian – Wichert, Martin – Kolb, Gunther – Held, Michael (2022) "Biogas catalytic methanation for biomethane production as fuel in freight transport – A carbon footprint assessment." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 168: 1–13.
- Biovoima (2020) 8 myyttiä biokaasusta – totta vai tarua. 21.04. <https://biovoima.com/blogi/8-myyttia-biokaasusta-totta-vai-tarua>.
- Boonrod, Bulin – Prapainainar, Chaiwat – Narataruksa, Phavanee – Kantama, Angsana – Saibautrong, Worayut – Sudsakorn, Kandis – Mungcharoen, Thumrongrut – Prapainainar, Paweena (2017) "Evaluating the environmental impacts of bio-hydrogenated diesel production from palm oil and fatty acid methyl ester through life cycle assessment." *Journal of Cleaner Production*, 142: 1210–1221. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.128>.
- Breed, Annelis K. – Speth, Daniel – Plötz, Patrick (2021) "CO₂ fleet regulation and the future market diffusion of zero-emission trucks." *Energy Policy*, 159: 1–13.
- Brändle, Gregor – Schönfisch, Max – Schulte, Simon (2021) "Estimating long-term global supply costs for low-carbon hydrogen." *Applied Energy*, 302: 1–27.
- Burke, Andrew – Sinha, Anish Kumar (2020) *Technology, Sustainability, and Marketing of Battery Electric and Hydrogen Fuel Cell Medium-Duty and Heavy-Duty Trucks and Buses in 2020–2040*. National Center for Sustainable Transportation.
- Börjesson, Pål – Lantz, Mikael – Andersson, Jim – Björnsson, Lovisa – Fredriksson Möller, Björn – Fröberg, Magnus – Hanarp, Per – Ahlgren, Serina – Jivén, Karin – Persson, Mats – Svensson, Helena – Tufvesson, Linda (2016) *Methane as Vehicle Fuel – A well-to-wheel analysis*. f3 The Swedish Knowledge Centre for Renewable Transportation Fuels.
- Çabukoglu, Emir – Georges, Gil – Küng, Lukas – Pareschi, Giacomo – Boulouchos, Konstantinos (2018) "Battery electric propulsion: An option for heavy-duty

vehicles? Results from a Swiss case-study.” *Transportation Research Part C*, 88: 107–123. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2018.01.013>.

Çabukoglu, Emir – Georges, Gil – Küng, Lukas – Pareschi, Giacomo – Boulouchos, Konstantinos (2019) ”Fuel cell electric vehicles: An option to decarbonize heavy-duty transport? Results from a Swiss case-study.” *Transportation Research Part D*, 70: 35–48. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2019.03.004>.

Calise, Francesco – Cappiello, Francesco Liberato – Cimmino, Luca – Dentice d’Accadia, Massimo – Vicidomini, Maria (2024) ”Single mixed refrigerant biomethane liquefaction plant integrated with solar energy: Dynamic simulation for the decarbonization of the heavy road transport sector.” *Journal of Environmental Management*, 361: 1–14.

Camacho, María de las Nieves – Jurburg, Daniel – Tanco, Martín (2022) ”Hydrogen fuel cell heavy-duty trucks: Review of main research topics.” *International Journal of Hydrogen Energy*, 47: 29505–29525. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.06.271>.

cellcentric (2024) *Technology*. <https://www.cellcentric.net/en-us/technology>.

CharIN (2022) *CharIN Whitepaper: Megawatt Charging System*. CharIN.

Choi, Younseok – Kim, Jungwoog – Park, Seungyup – Park, Hyunjun – Chang, Daejun (2022) ”Design and analysis of liquid hydrogen fuel tank for heavy duty truck.” *International Journal of Hydrogen Energy*: 14687–14702. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.02.210>.

Clairotte, Michaël – Suarez Bertoa, Ricardo – Zardini, Alessandro A. – Giechaskiel, Barouch – Pavlovic, Jelica – Valverde, Victor – Ciufu, Biagio – Astorga, Covadonga (2020) ”Exhaust emission factors of greenhouse gases (GHGs) from European road vehicles.” *Environmental Sciences Europe*: 1–20.

Clean Hydrogen Partnership (2019) ”Hydrogen Roadmap Europe: A sustainable pathway for the European Energy Transition.” Clean Hydrogen Partnership Web site. https://www.clean-hydrogen.europa.eu/document/download/b4ea2b61-a7da-4484-a522-1b2232bff134_en?filename=Hydrogen%20Roadmap%20Europe_Report.pdf.

- Cooper, Jasmin – Hawkes, Adam – Balcombe, Paul (2019) "Life cycle environmental impacts of natural gas drivetrains used in UK road freighting and impacts to UK emission targets." *Science of the Total Environment*, 674: 482–493.
- Cunanan, Carlo – Tran, Manh-Kien – Lee, Youngwoo – Kwok, Shinghei – Leung, Vincent – Fowler, Michael (2021) "A Review of Heavy-Duty Vehicle Powertrain Technologies: Diesel Engine Vehicles, Battery Electric Vehicles, and Hydrogen Fuel Cell Electric Vehicles." *Clean Technologies*: 1–16. <https://doi.org/10.3390/>
- da Silva Veras, Tatiane – Mozer, Thiago Simonato – Messeder dos Santos, Danielle da Costa Rubim – César, Aldara da Silva (2017) "Hydrogen: Trends, production and characterization of the main process worldwide." *International Journal of Hydrogen Energy*, 42: 2018–2033.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.08.219>.
- DAF (2024a) *DAF delivers first electric trucks from new generation*.
<https://www.daf.com/en/news-and-media/news-articles/global/2024/21-08-2024-daf-delivers-first-electric-trucks-from-new-generation>.
- DAF (2024b) *Hydrogen: An interesting option for the future*. <https://www.daf.co.uk/en-gb/trucks/alternative-fuels-and-drivelines/hydrogen>.
- Daimler Truck (2023) "Daimler Truck #HydrogenRecordRun: Mercedes-Benz GenH2 Truck cracks 1,000 kilometer mark with one fill of liquid hydrogen." Daimler Truck Web site. <https://www.daimlertruck.com/en/newsroom/pressrelease/daimler-truck-hydrogenrecordrun-mercedes-benz-genh2-truck-cracks-1000-kilometer-mark-with-one-fill-of-liquid-hydrogen-52369346>.
- Daimler Truck (2022) "Mercedes-Benz Trucks to unveil the eActros LongHaul electric truck for long-distance transport in September." Daimler Truck. Haettu 17.11.2024. <https://www.daimlertruck.com/en/newsroom/pressrelease/mercedes-benz-trucks-to-unveil-the-eactros-longhaul-electric-truck-for-long-distance-transport-in-september-51968530>.
- Danielis, Romeo – Scorrano, Mariangela – Giansoldati, Marco (2022) "Decarbonising transport in Europe: Trends, goals, policies and passenger car scenarios." *Research in Transportation Economics*, 91: 1–12.
- DB Schenker (2020) *Kuljetuskalusto*.

- de Blas, Ignacio – Mediavilla, Margarita – Capellán-Pérez, Iñigo – Duce, Carmen (2020) "The limits of transport decarbonization under the current growth paradigm." *Energy Strategy Reviews*, 32: 1–23.
- Delgado, Oscar – Rodríguez, Felipe – Muncrief, Rachel (2017) Fuel Efficiency Technology in European Heavy-Duty Vehicles: Baseline and Potential for 2020–2030 Time Frame. White Paper: ICCT.
- Ding, Yuanli – Cano, Zachary P. – Yu, Aiping – Lu, Jun – Chen, Zhongwei (2019) "Automotive Li Ion Batteries: Current Status and Future Perspectives." *Electrochemical Energy Reviews*: 1–28. <https://doi.org/10.1007/s41918-018-0022-z>.
- Dornoff, Jan – Rodríguez, Felipe (2024) Euro 7: The new emission standard for light- and heavy-duty vehicles in the European Union. ICCT.
- EBA (2022), Breaking Free of the Energy Dependency Trap: Delivering 35 bcm of biomethane by 2030, European Biogas Association.
- EEA (2022a), "Transport and Environment Report 2022. Digitalisation in the mobility system: challenges and opportunities," Luxemburg: Publications Office of the European Union, <https://www.eea.europa.eu/publications/transport-and-environment-report-2022/transport-and-environment-report/view>.
- EEA (2022b), "Trends in CO₂ emissions from heavy-duty vehicles in the EU, 1990–2020", <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/trends-of-co2-emissions-from/>.
- ELY-keskus (2025), "Talvihoito", <https://www.ely-keskus.fi/talvihoito>.
- ESCALATE (2024), <https://www.escalate-eu.com/>.
- Euroopan komissio (2011), "Roadmap to a Single European Transport Area – Towards a competitive and resource", *White Paper*.
- Euroopan komissio (2019), "The European Green Deal."
- Euroopan komissio (2020), State of the Art on Alternative Fuels Transport Systems in the European Union, Brussels: Publications Office of the European Union.
- Euroopan komissio (2021), EU Reference Scenario 2020: Energy, transport and GHG emissions – Trends to 2050, Luxemburg: Publications Office of the European Union.

- Euroopan komissio (2023a), "The update of the nationally determined contribution of the European Union and its Member States", Madrid.
- Euroopan komissio (2023b), "Circular economy: New law on more sustainable, circular and safe batteries enters into force", *Energy, Climate change, Environment*, 17.08.2023, https://environment.ec.europa.eu/news/new-law-more-sustainable-circular-and-safe-batteries-enters-force-2023-08-17_en.
- Euroopan komissio (2024a), "Vehicle Energy Consumption Calculation Tool – VECTO", haettu 20.05.2024, https://climate.ec.europa.eu/eu-action/transport/road-transport-reducing-co2-emissions-vehicles/vehicle-energy-consumption-calculation-tool-vecto_en.
- Euroopan komissio (2024b), "Reducing CO₂ emissions from heavy-duty vehicles", haettu 04.04.2024, https://climate.ec.europa.eu/eu-action/transport/road-transport-reducing-co2-emissions-vehicles/reducing-co2-emissions-heavy-duty-vehicles_en.
- Euroopan komissio (2024c), *Energy, Climate change, Environment: Climate Action*, haettu 03.04.2024, https://climate.ec.europa.eu/index_en.
- Euroopan komissio (2024d), *Guidance Document: The Monitoring and Reporting Regulation*, https://climate.ec.europa.eu/document/download/b5ccad58-6909-4a32-8a72-c73ab8d2a165_en?filename=policy_ets_ets2_gd_regulated_entities_en.pdf.
- Euroopan komissio (2024e), "REPowerEU: Affordable, secure and sustainable energy for Europe", https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/repowereu-affordable-secure-and-sustainable-energy-europe_en.
- Euroopan parlamentti (2023), "Climate change: the greenhouse gases causing global warming", haettu 23.03.2023, <https://www.europarl.europa.eu/topics/en/article/20230316STO77629/climate-change-the-greenhouse-gases-causing-global-warming>.
- Euroopan parlamentti (2024), *Revision of the Weights and Dimensions Directive*, European Union.

- Euroopan parlamentti ja Euroopan unionin neuvosto (2009), *Directive 2009/28/EC of the European Parliament and of the Council, Official Journal of the European Union*.
- Euroopan parlamentti ja Euroopan unionin neuvosto (2011), *Commission Regulation (EU) No 582/2011, Official Journal of the European Union*.
- Euroopan parlamentti ja Euroopan unionin neuvosto (2017), *Regulation 2017/2400, Official Journal of the European Union*.
- Euroopan parlamentti ja Euroopan unionin neuvosto (2018), ”Regulation (EU) 2018/2001”, *Official Journal of the European Union*.
- Euroopan parlamentti ja Euroopan unionin neuvosto (2019), *Regulation (EU) 2019-1242 of the European Parliament and the Council, Official Journal of the European Union*.
- Euroopan parlamentti ja Euroopan unionin neuvosto (2023a), *Regulation (EU) 2023/2413, Official Journal of the European Union*.
- Euroopan parlamentti ja Euroopan unionin neuvosto (2023b), *Regulation (EU) 2023/1804 of the European Parliament and of the Council, Official Journal of the European Union*.
- Euroopan parlamentti ja Euroopan unionin neuvosto (2024), *Regulation (EU) 2024/1610, Official Journal of the European Union*.
- Euroopan unionin neuvosto (1996), *Council Directive 96/53/EC, Official Journal L 235*.
- Euroopan unionin neuvosto (2024a), ”Raskaat ajoneuvot: neuvosto hyväksyi tiukemmat hiilidioksidipäästönormit”, *Euroopan unionin neuvoston lehdistötiedote*, <https://www.consilium.europa.eu/fi/press/press-releases/2024/05/13/heavy-duty-vehicles-council-signs-off-on-strict-co2-emission-standards/>.
- Euroopan unionin neuvosto (2024b), ”Euro 7: Council adopts new rules on emission limits for cars, vans and trucks”, *Euroopan unionin neuvoston lehdistötiedote*, <https://www.consilium.europa.eu/fi/press/press-releases/2024/04/12/euro-7-council-adopts-new-rules-on-emission-limits-for-cars-vans-and-trucks/>.

- European Alternative Fuels Observatory (2025), "Road: European Union", Euroopan komissio, 17.06.2025, <https://alternative-fuels-observatory.ec.europa.eu/transport-mode/road/european-union-eu27>.
- Eurostat (2024a), "Road freight transport statistics", 07.2024, https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Road_freight_transport_statistics.
- Eurostat (2024b), "Road freight transport by journey characteristics", *Statistics Explained*, 01.08.2024, https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Road_freight_transport_by_journey_characteristics#Average_distance_travelled_per_tonne_of_load.
- Eurostat (2024c), *Road freight transport by vehicle characteristics*, 07.2024.
- Eurostat (2025), Road freight transport by type of operation and type of transport https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/road_go_ta_tott_custom_15903977/default/table?lang=en.
- Fajri, Hamidreza – Rieß, Sebastian – Clemente Mallada, Rafael – Ruoff, Ilona – Wensing, Michael (2023) "Optical measurements of two cylindrical and conical heavy-duty diesel injector nozzles – A comparison of reference diesel, HVO, and RME fuels." *Energy Conversion and Management*, 1–17.
- Fingrid (2025) "Miten sähköön hinta muodostuu?" <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/yleistietoa-sahkomarkkinoista/miten-sahkon-hinta-muodostuu/>.
- Finlex (2021) "Laki vaihtoehtoisella käyttövoimalla toimivan ajoneuvon hankinnan sekä ajoneuvon vaihtoehtoisella käyttövoimalla toimivaksi muuntamisen määräaikaisesta tukemisesta. 1289/2021." <https://www.finlex.fi/fi/lainsaadanto/2021/1289>.
- Forrest, Kate – MacKinnon, Michael – Tarroja, Brian – Samuelsen, Scott (2020) "Estimating the technical feasibility of fuel cell and battery electric vehicles for the medium and heavy duty sectors in California." *Applied Energy*, 276: 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115439>.
- Frenzel, Ina – Anderson, John E. – Lischke, Andreas – Eisenmann, Christine (2021) "Renewable fuels in commercial transportation: Identification of early adopter, user acceptance, and policy implications." *Case Studies on Transport Policy*, 9: 1245–1260. <https://doi.org/10.1016/j.cstp.2021.06.010>.

- Giuliano, Genevieve – Dessouky, Maged – Dexter, Sue – Fang, Jiawen – Hu, Shichun – Miller, Marshall (2021) ”Heavy-duty trucks: The challenge of getting to zero.” *Transportation Research Part D*, 93: 1–16.
<https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.102742>.
- Guerrero de la Peña, Ana – Davendralingam, Navindran – Raz, Ali K. – DeLaurentis, Daniel – Shaver, Gregory – Sujan, Vivek – Jain, Neera (2020) ”Projecting adoption of truck powertrain technologies and CO₂ emissions in line-haul networks.” *Transportation Research Part D*, 84: 1–30.
<https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102354>.
- Gustafsson, Marcus – Cruz, Igor – Svensson, Niclas – Karlsson, Magnus (2020) ”Scenarios for upgrading and distribution of compressed and liquefied biogas — Energy, environmental, and economic analysis.” *Journal of Cleaner Production*, 256: 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120473>.
- Gustafsson, Marcus – Svensson, Niclas (2021) ”Cleaner heavy transports – Environmental and economic analysis of liquefied natural gas and biomethane.” *Journal of Cleaner Production*, 278: 1–14.
- Halder, Pobitra – Babaie, Meisam – Salek, Farhad – Haque, Nawshad – Savage, Russell – Stevanovic, Svetlana – Bodisco, Timothy A. – Zare, Ali (2024) ”Advancements in hydrogen production, storage, distribution and refuelling for a sustainable transport sector: Hydrogen fuel cell vehicles.” *International Journal of Hydrogen Energy*, 52: 973–1004. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.07.204>.
- Hyttinen, Jukka – Ussner, Matthias – Österlöf, Rickard – Jerrelind, Jenny – Drugge, Lars (2022) ”Effect of Ambient and Tyre Temperature on Truck Tyre Rolling Resistance.” *International Journal of Automotive Technology*: 1651–1661.
- Hyundai (2023) *XCIENT Fuel Cell*. Hyundai Motor Company. <https://ecv.hyundai.com/resources/assets/file/XCIENT-Fuel-Cell-Truck-Catalog-Single-EN.pdf>.
- Hyzon (2024) 19.09.2024 <https://www.hyzonfuelcell.com/>.
- Ilmatieteen laitos (2021) Tilastoja Suomen ilmastosta ja merestä 1991–2020. Helsinki: Ilmatieteen laitos.
<https://helda.helsinki.fi/items/d7ce3a4f-bf47-4453-be76-2a0de738c59a>.

- Ilmatieteen laitos (2025a) *Termiset vuodenajat*. Haettu 16.03.2025. <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/termiset-vuodenajat>.
- Ilmatieteen laitos (2025b) *Erikoiset kysymykset*. 2.2. 18.03.2025. <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/erikoiset-kysymykset>.
- International Transport Forum (2022) *Permissible Maximum Weights of Lorries in Europe*. https://www.itf-oecd.org/sites/default/files/docs/weights-2021_0.pdf.
- Iveco (2022a) Your new S-WAY of life.
- Iveco (2022b) "IVECO to supply Hegelmann Group with a further 150 IVECO S-WAY LNG and 10 IVECO S-WAY CNG tractor units." <https://www.iveco.com/en-us/press-room/release/Pages/IVECO-to-supply-Hegelmann-Group-with-a-further-150-IVECO-S-WAY-LNG-and-10-IVECO-S-WAY-CNG-tractor-units.aspx>.
- Iveco (2023) Press Release: IVECO to produce and market its Heavy-Duty Battery Electric Vehicle and Heavy-Duty Fuel. Turin: IVECO. https://www.iveco.com/global/-/media/Iveco---Press-Import/global/Pdfs/PR_IVECO_HDT_BEV_FCEV_def.pdf?rev=2f19d1b527104c4685bd7978f3fb2753.
- Jahangir Samet, Mehdi – Liimatainen, Heikki – Pihlatie, Mikko – van Vliet, Oscar Patrick René (2024) "Levelized cost of driving for medium and heavy-duty battery electric trucks." *Applied Energy*, 361.
- Joint Research Centre (2014) *Well-to-Tank Report Version 4.a*. Publications Office of the European Union.
- Joint Research Centre (2020) JEC Well-To-Wheels report v5. Luxembourg: Publications Office of the European Union.
- Jyväskylän elinkeinopalvelut (2024) "Suomen ensimmäinen käyttöön tuleva vetytankkausasema rakennetaan Jyväskylään – Mahdollistaa vetybussien käyttöönoton ensimmäisenä Suomessa." 23.09.2024 <https://elinkeinopalvelut.jyvaskyla.fi/ajankohtaista/suomen-ensimm%C3%A4inen-k%C3%A4ytt%C3%B6nC3%B6nC3%B6n-tuleva-vetytankkausasema-rakennetaan-jyv%C3%A4skyl%C3%A4n-mahdollistaa-vetybussien->

k%C3%A4ytt%C3%B6nC3%B6noton-ensimm%C3%A4isen%C3%A4-suomessa.

- Kast, James – Morrison, Geoffrey – Gangloff Jr., John J. – Vijayagopal, Ram – Marcinkoski, Jason (2018) "Designing hydrogen fuel cell electric trucks in a diverse medium and heavy duty market." *Research in Transportation Economics*, 70: 139–147. <https://doi.org/10.1016/j.retrec.2017.07.006>.
- Kempower (2024) "Kempower powers Finland's largest EV fast-charging hub – ABC Lataus in Heinola offers a total capacity of 2.4 megawatts." 01.11. <https://kempower.com/news/abc-lataus-heinola/>.
- Klemola, Kimmo (2023) *Dieselin hinnan muodostuminen*. Cleanfi Oy.
- Kolb, Sebastian – Plankenbühler, Thomas – Hofmann, Katharina – Bergerson, Joule (2021) "Life cycle greenhouse gas emissions of renewable gas technologies: A comparative review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 1–20. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111147>.
- Kärhä, Kalle – Kortelainen, Emma – Karjalainen, Antti – Haavikko, Hanna – Palander, Teijo (2023) "Fuel consumption of a high-capacity transport (HCT) vehicle combination for industrial roundwood hauling: a case study of laden timber truck combinations in Finland." *International Journal of Forest Engineering*, 34: 284–293. <https://doi.org/10.1080/14942119.2022.2163871>.
- Lahti, Otto – Tantt, Anneli (2018) "HCT-liikenteen talvikausi 2017–18." *Liikenteen turvallisuusvirasto*. Kausiraportti 6: 1–23.
- Lahti, Otto (2021) *Uusi tieliikennelaki ja rekkojen käytösäännöt*. Traficom julkaisu 10/2021.
- Laitila, Juha – Asikainen, Antti – Ranta, Tapio (2016) "Cost analysis of transporting forest chips and forest industry by-products with large truck-trailers in Finland." *Biomass and Bioenergy*, 90: 252–261.
- Lajevardi, Mojtaba S. – Axsen, Jonn – Crawford, Curran (2019) "Comparing alternative heavy-duty drivetrains based on GHG emissions, ownership and abatement costs: Simulations of freight routes in British Columbia." *Transportation Research Part D*, 76: 19–55. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2019.08.031>.

- Larnaudie, Valeria – Bule, Mahesh – Sand, Ka-Yiu – Vadlani, Praveen V. – Mosby, James – Elangovan, S. – Karanjikar, Mukund – Spatari, Sabrina (2020) "Life cycle environmental and cost evaluation of renewable diesel production." *Fuel*, 279: 1–19. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118429>.
- Letkiewicz, Andrzej – Ławreszuk, Małgorzata – Majecka, Beata (2023) "The Green Deal – Activity and expectations of Polish large and medium-sized road freight carriers in relation to potential regulatory solutions." *Research in Transportation Business & Management*, 48: 1–10.
- Ligen, Yorick – Vrabel, Heron – Girault, Hubert H. (2018) "Mobility from Renewable Electricity: Infrastructure Comparison for Battery and Hydrogen Fuel Cell Vehicles." *World Electric Vehicle Journal*, 1–12. <https://doi.org/10.3390/wevj9010003>.
- Liimatainen, Heikki – van Vliet, Oscar – Aplyn, David (2019) "The potential of electric trucks – An international commodity-level analysis." *Applied Energy*, 236: 804–814. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.12.017>.
- Liimatainen, Heikki – Viri, Riku – Nikula, Harri – Tiikkaja, Hanne – Utriainen, Roni (2023) Liikenteen päästövähennystoimenpiteiden kokonaisvaltainen taloudellinen arviointi. Helsinki: Valtioneuvoston kanslia. <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-383-200-8>.
- Lindqvist, David – Salman, Marwan – Bergqvist, Rickard (2020) "A cost benefit model for high capacity transport in a comprehensive line-haul network." *European Transport Research Review*, 12: 1–13. <https://doi.org/10.1186/s12544-020-00451-5>.
- Linjala, Onni – Kajolinna, Tuula (2023) Industrial CO2 supply pathways for CCU-based electrofuel production in Finland. VTT Technical Research Centre of Finland. <https://cris.vtt.fi/en/publications/51a6692a-7b9b-46aa-a4f1-fbcc202966e0>.
- Link, Steffen – Stephan, Annegret – Speth, Daniel – Plötz, Patrick (2024) "Rapidly declining costs of truck batteries and fuel cells enable large-scale road freight electrification." *Nature Energy*, 9: 1032–1039.
- Liu, Feiqi – Mauzerall, Denise L. – Zhao, Fuquan – Hao, Han (2021) "Deployment of fuel cell vehicles in China: Greenhouse gas emission reductions from converting

the heavy-duty truck fleet from diesel and natural gas to hydrogen.” *International Journal of Hydrogen Energy*, 46: 17982–17997.

<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.02.198>.

Lombardi, Simone – Tribioli, Laura – Guandalini, Giulio – Iora, Paolo (2020) ”Energy performance and well-to-wheel analysis of different powertrain solutions for freight transportation.” *International Journal of Hydrogen Energy*, 45: 12535–12554.

Lundberg, Petter (2014) Investigation of the transient nature of rolling resistance on an operating Heavy Duty Vehicle. Master's Thesis. Umeå University.

Maailmanpankki (2023) The World Bank: Data. <https://data.worldbank.org/indicator/EN.ATM.CO2E.KT>.

Machado, Pedro G. – Teixeira, Ana C. R. – Collaço, Flavia M. A. – Mouette, Dominique (2020) ”Review of life cycle greenhouse gases, air pollutant emissions and costs of road medium and heavy-duty trucks.” *WIREs Energy and Environment*, 9: 1–18.

Madhusudhanan, Anil K. – Na, Xiaoxiang – Boies, Adam – Cebon, David (2020) ”Modelling and evaluation of a biomethane truck for transport performance and cost.” *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 87: 1–12.

Magnino, Alessandro – Marocco, Paolo – Saarikoski, Aleksandra – Ihonon, Jari – Rautanen, Markus – Gandiglio, Marta (2024) ”Total cost of ownership analysis for hydrogen and battery powertrains: A comparative study in Finnish heavy-duty transport.” *Journal of Energy Storage*, 99: 1–14.

Magnusson, Thomas – Anderberg, Stefan – Dahlgren, Sofia – Svensson, Niclas (2020) ”Socio-technical scenarios and local practice – Assessing the future use of fossil-free alternatives in a regional energy and transport system.” *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 5: 1–13.

<https://doi.org/10.1016/j.trip.2020.100128>.

MAN (2023) ”Sale of the new MAN eTruck starts.” 30.10.2023 <https://press.man-truckandbus.com/corporate/sale-of-the-new-man-etruck-startsen/>.

MAN (2024) "MAN expands its zero-emission portfolio." 08.04.2024

<https://press.mantruckandbus.com/corporate/man-expands-its-zero-emission-portfolio/>.

Manoharan, Yogesh – Hossein, Seyed Ehsan – Butler, Brayden – Alzahrani, Hisham – Senior, Bhi Thi Fou – Ashuri, Turaj – Krohn, John (2019) "Hydrogen Fuel Cell Vehicles; Current Status and Future Prospect." *Applied Sciences*, 9: 1–17.
<https://doi.org/10.3390/app9112296>.

Mareev, Ivan – Becker, Jan – Sauer, Dirk Uwe (2018) "Battery Dimensioning and Life Cycle Costs Analysis for a Heavy-Duty Truck Considering the Requirements of Long-Haul Transportation." *Energies*, 1–23.

Meersman, Hilde – Van de Voorde, Eddy (2013) "The Relationship between Economic Activity and Freight Transport." *Freight Transport Modelling*, 17–43. Emerald Publishing Limited.

Mendoza-Villafuerte, Pablo – Suarez-Bertoa, Ricardo – Giechaskiel, Barouch – Riccobono, Francesco – Bulgheron, Claudia – Astorga, Covadonga – Perujo, Adolfo (2017) "NO_x, NH₃, N₂O and PN real driving emissions from a Euro VI heavy-duty vehicle. Impact of regulatory on-road test conditions on emissions." *Science of the Total Environment*, 609: 546–555.

Mercedes Benz Trucks (2024) "The new eActros 600 – International Truck of the Year 2025." <https://hub.mercedes-benz-trucks.com/int/en/trucks/eactros-600.html>.

Pääkkönen, Anna – Aro, Kalle – Aalto, Pami – Konttinen, Jukka – Kojo, Matti (2019) "The Potential of Biomethane in Replacing Fossil Fuels in Heavy Transport—A Case Study on Finland." *Sustainability*, 1–19.

Metsäranta, Heikki – Somerpalo, Sakari – Lampinen, Seppo (2024) *Liikenteen hallinnonalan tuet liikennepolitiikan keinoina. Esiselvitys tukien vaikutuksista ja niiden arvioinnista*. Traficom.

Middela, Mounisai Siddartha – Mane, Ajinkya – Djordjevic, Boban – Ghosh, Bidisha (2024) "Greenhouse gas emissions from heavy-duty vehicles in Ireland." *Transportation Research Part D*, 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2024.104156>.

- Miller, Joshua (2016) "Reducing CO₂ emissions from road transport in the European Union: An evaluation of policy options." *The International Council on Clean Transportation*, 1–10.
- Mohideen, Mohamedazeem M. – Subramanian, Balachandran – Sun, Jingyi – Ge, Jing – Guo, Han – Radhamani, Adiyodi Veetil – Ramakrishna, Seeram – Liu, Yong (2023) "Techno-economic analysis of different shades of renewable and non-renewable energy-based hydrogen for fuel cell electric vehicles." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113153>.
- Moilanen, Paavo – Niinikoski, Miikka – Honkatukia, Juha (2021) *Polttoaineet hintaskenaariot. Mallituloksia*. Ramboll Finland Oy.
- Molnár, Péter – Suta, Alex – Tóth, Árpád (2023) "Sustainability accounting for greenhouse gas emissions measurement using the GREET LCA model: practical review of automotive ESG reporting." *Clean Technologies and Environmental Policy*, 1–12.
- Mottschall, Moritz – Kasten, Peter – Rodríguez, Felipe (2020) *Decarbonization of on-road freight transport and the role of LNG from a German perspective*. Berlin: ICCT.
- Mulholland, Eamonn (2024) "The Revised CO₂ Standards for Heavy-Duty Vehicles in the European Union." *ICCT*, 13.5. <https://theicct.org/publication/revised-co2-standards-hdvs-eu-may24/>.
- Mulholland, Eamonn – Teter, Jacob – Cazzola, Pierpaolo – McDonald, Zane – Ó Gallachóir, Brian P. (2018) "The long haul towards decarbonising road freight – A global assessment to 2050." *Applied Energy*, 216: 678–693. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.01.058>.
- Murto, Petri (2024) *O 9/2024 vp Autoilun verotuksen kokonaisuus*. Suomen Kuljetus ja Logistiikka SKAL ry.
- Murto, Petri (2018) *Tulevaisuuden mitat ja massat & ajankohtaista lainsäädännöstä*. Helsinki: ADR-seminaari 2018.
- Müller, Christoph (2024) "Transition to battery-electric and fuel cell heavy-duty trucks: A multi-level, multi-dimensional approach." *Transportation Research Part D*, 127: 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2024.104052>.

- Na, Kwangsam – Biswas, Subhasis – Robertson, William – Sahay, Keshav – Okamoto, Robert – Mitchell, Alexander – Lemieux, Sharon (2015) ”Impact of biodiesel and renewable diesel on emissions of regulated pollutants and greenhouse gases on a 2000 heavy duty diesel truck.” *Atmospheric Environment*, 307–314.
- Nationaler Wasserstoffrat (2024) ”German National Hydrogen Council recommends standardised taxation of hydrogen in the mobility sector.” https://www.wasserstoffrat.de/fileadmin/wasserstoffrat/media/Dokumente/EN/2024/2024-01-19_NWR-Statement_H2_Taxation_in_Mobility.pdf.
- Nemmour, Amira – Inayat, Abrar – Janajreh, Isam – Ghenai, Chaouki (2023) ”Green hydrogen-based E-fuels (E-methane, E-methanol, E-ammonia) to support clean energy transition: A literature review.” *International Journal of Hydrogen Energy*, 29011–29033. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.03.240>.
- Neste (2020a) Neste Renewable Diesel Handbook. Neste Proprietary publication.
- Neste (2020b) ”Technical Data Sheet: Neste Futura Diesel kesälaatu.” [https://www.neste.com/files/pdf/1PDFpyR4jXsMiQzTobD6 ta-150240_fi.pdf](https://www.neste.com/files/pdf/1PDFpyR4jXsMiQzTobD6%20ta-150240_fi.pdf).
- Neste (2020c) ”Technical Data Sheet: Neste Futura Diesel -29/-38.” https://www.neste.com/files/pdf/4mkZ4czEFRWdYAiNuigSJs-150445_fi.pdf.
- Neste (2024a) ”Tulevaisuuden raaka-aineet.” 21.10.2024. <https://www.neste.fi/vastuulliset-ratkaisut/ratkaisut/raaka-aineet/tulevaisuuden-raaka-aineet>.
- Neste (2024b) ”Neste opens its first high-power charging service for heavy-duty vehicles along highway 3 at the Linnatuuli service station in Finland.” 13.02.2024 <https://www.neste.com/news/neste-opens-its-first-high-power-charging-service-for-heavy-duty-vehicles-along-highway-3-at-the-linnatuuli-service-station-in-finland>.
- Nikola (2024) 19.09.2024 <https://www.nikolamotor.com/>.
- Noll, Bessie – del Val, Saniago – Schmidt, Tobias S. – Steffen, Bjarne (2022) ”Analyzing the competitiveness of low-carbon drive-technologies in road-freight: A total cost of ownership analysis in Europe.” *Applied Energy*, 306: 1–26.
- Nordsol (2023) 19.12.2023 <https://nordsol.com/articles/what-is-bio-lng/>.

- Noussan, Michel – Negro, Viviana – Prussi, Matteo – Chiaramonti, David (2024) "The potential role of biomethane for the decarbonization of transport: An analysis of 2030 scenarios in Italy." *Applied Energy*, 355: 1–14.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.122322>.
- Nykvist, Björn – Olsson, Olle (2021) "The feasibility of heavy battery electric trucks." *Joule*, 5: 901–913. <https://doi.org/10.1016/j.joule>.
- OECD (2011) Moving Freight with Better Trucks. Research Report. OECD.
- Osieczko, Kornelia – Zimon, Dominik – Płaczek, Ewa – Prokopiuk, Iryna (2021) "Factors that influence the expansion of electric delivery vehicles and trucks in EU countries." *Journal of Environmental Management*, 296: 1–10.
- Osorio-Tejada, Jose Luis – Llera-Sastresa, Eva – Scarpellini, Sabina (2017) "A multi-criteria sustainability assessment for biodiesel and liquefied natural gas as alternative fuels in transport systems." *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 42: 169–186. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jngse.2017.02.046>.
- Parviziomran, Elmira – Bergqvist, Rickard (2023) "A cost analysis of decarbonizing the heavy-duty road transport sector." *Transportation Research Part D*, 120: 1–20.
<https://doi.org/10.1016/j.trd.2023.103751>.
- Parviziomran, Elmira – Elliot, Viktor – Bergqvist, Rickard (2024) "Financing dynamics in sustainable heavy-duty road transport: An agent-based modeling approach." *Transportation Research Part D*, 1–23.
- Peters, Ralf – Breuer, Janos Lucian – Decker, Maximilian – Grube, Thomas – Robinius, Martin – Samsun, Remzi Can – Stolten, Detlef (2021) "Future Power Train Solutions for Long-Haul Trucks." *Sustainability*, 1–57.
<https://doi.org/10.3390/su13042225>.
- Pihlatie, Mikko – Ranta, Mikaela – Rahkola, Pekka – Åman, Rafael (2023) "Zero-Emission Truck Powertrains for Regional and Long-Haul Missions." *World Electric Vehicle Journal*, 1–11. <https://doi.org/10.3390/wevj14090253>.
- Proskurina, Svetlana – Mendoza-Martinez, Clara (2023) "Expectations for Bioenergy Considering Carbon Neutrality Targets in the EU." *Energies*, 1–16.
<https://doi.org/10.3390/en16145314>.

- Prussi, Matteo – Padella, Monica – Conton, Michela – Postma, E. D. – Lonza, Laura (2019) ”Review of technologies for biomethane production and assessment of EU transport share in 2030.” *Journal of Cleaner Production*, 565–572. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.271>.
- Pääkkönen, Anna – Aro, Kalle – Aalto, Pami – Konttinen, Jukka – Kojo, Matti (2019) ”The Potential of Biomethane in Replacing Fossil Fuels in Heavy Transport—A Case Study on Finland.” *Sustainability*, 1–19.
- Rahkola, Pekka (2019) ”Raskaan kaluston VECTO-simulointi Suomessa”. Liikenne- ja viestintävirasto Traficom.
- Rainforest Foundation Norway (2023) ”PFAD and biofuels”. Oslo: Rainforest Foundation Norway. https://dv719tqmsuwvb.cloudfront.net/documents/Publikasjoner/Andre-rapporter/RF_PFAD_report_1123_oppslag.pdf.
- Rajalehto, Clara – Helo, Petri (2025) ”Comparing feasibility of low-carbon heavy-duty road freight vehicles.” *Journal of Cleaner Production*, 509: 1–19.
- Rajamäki, Riikka – Lahti, Otto (2022) ”Kuorma-autojen ja raskaiden ajoneuvoyhdistelmien pituus ja nopeus”. *LAM-pisteiden havainnot syyskuussa 2021*. Liikenne- ja viestintävirasto Traficom.
- Rasul, M.G. – Hazrat, M.A. – Sattar, M.A. – Jahirul, M.I. – Shearer, M.J. (2022) ”The future of hydrogen: Challenges on production, storage and applications.” *Energy Conversion and Management*, 272: 1–40. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.116326>.
- Ravi, Sai Sudharshan – Aziz, Muhammad (2022) ”Clean hydrogen for mobility – Quo vadis?” *International Journal of Hydrogen Energy*, 47: 20632–20661.
- Ren, Jianwei – Musyoka, Nicholas M. – Langmi, Henrietta W. – Mathe, Mkhulu – Liao, Shijun (2017) ”Current research trends and perspectives on materials-based hydrogen storage solutions: A critical review.” *International Journal of Hydrogen Energy*, 42: 289–311. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.11.195>.
- Renault Trucks (2024) ”News from Renault Trucks HQ: Bourg-en-Bresse Braced for Production of Renault Trucks E-Tech T & C.” 14.10. <https://www.renaulttruckcommercials.co.uk/bourg-en-bresse-braced-for-production-ofrenault-trucks-e-tech-t-c/>.

- Rial, Mario – Pérez, Javier (2021) "Environmental performance of four different heavy-duty propulsion technologies using Life Cycle Assessment." *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 11: 1–15.
<https://doi.org/10.1016/j.trip.2021.100428>.
- Robaina, Margarita – Neves, Ana (2021) "Complete decomposition analysis of CO₂ emissions intensity in the transport sector in Europe." *Research in Transportation Economics*, 90: 1–13.
- Rodrigue, Jean-Paul – Comtois, Claude – Slack, Brian (2013) "Transportation modes." Teoksessa: *The Geography of Transport Systems*. 3rd ed. Abingdon, Oxon: Routledge.
- Rodrigue, Jean-Paul – Notteboom, Theo (2013) "Transportation and the economy." Teoksessa: *The Geography of Transport Systems*, 226–254. Abingdon, Oxon: Routledge.
- Rout, Cameron – Li, Hu – Dupont, Valerie – Wadud, Zia (2022) "A comparative total cost of ownership analysis of heavy duty on-road and off-road vehicles powered by hydrogen, electricity, and diesel." *Heliyon*, 8: 1–20.
- Scania (2020) "Scania Gas Trucks: Tomorrow's Power Today."
- Scania (2022) "Scania to deliver fuel cell trucks to Switzerland." 08.11.2022
<https://www.scania.com/group/en/home/newsroom/news/2022/scania-to-deliver-fuel-cell-trucks-to-switzerland.html>.
- Scania (2024a) *Aidosti kestävän kehityksen mukainen sähkökuorma-auto*. 11.10.2024
<https://www.scania.com/fi/fi/home/products/trucks/sahkokuorma-auto.html>.
- Scania (2024b) "Electric long haulage truck scheduled for regular traffic."
<https://www.scania.com/group/en/home/electrification/e-mobility-hub/electric-long-haulage-truck-scheduled-for-regular-traffic.html>.
- Schneider, Jakob – Teichert, Olaf – Zähringer, Maximilian – Balke, Georg – Lienkamp, Markus (2023) "The novel Megawatt Charging System standard: Impact on battery size and cell requirements for battery-electric long-haul trucks." *eTransportation*, 17: 1–11.
- Seitz, Claudio S. – Beuttenmüller, Oliver – Terzidis, Orestis (2015) "Organizational adoption behavior of CO₂-saving power train technologies: An empirical study

- on the German heavy-duty vehicles market.” *Transportation Research Part A*, 80: 247–262. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2015.08.002>.
- Sen, Burak – Ercan, Tolga – Tatari, Omer (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: 110–121. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.09.046>.
- Sens, Lucas – Neuling, Ulf – Wilbrand, Karsten – Kaltschmitt, Martin (2024) ”Conditioned hydrogen for a green hydrogen supply for heavy duty-vehicles in 2030 and 2050 – A techno-economic well-to-tank assessment of various supply chains.” *International Journal of Hydrogen Energy*, 49: 1185–1207. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.07.113>.
- Serra, Joao Vitor Fernandes (2012) “Electric Vehicles: Technology, Policy and Commercial Development”. Oxon: Taylor & Francis Group.
- Shahzad, Khurram – Cheema, Izzat Iqbal (2024) ”Low-carbon technologies in automotive industry and decarbonizing transport.” *Journal of Power Sources*, 1–30. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2023.233888>.
- Shoman, Wasim – Yeh, Sonia – Sprei, Frances – Plötz, Patrick – Speth, Daniel (2023) ”Battery electric long-haul trucks in Europe: Public charging, energy, and power requirements.” *Transportation Research Part D*, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2023.103825>.
- Siddi, Marco (2020) “The European Green Deal: Assessing Its Current State and Future Implementation”. Working Paper. Helsinki: Finnish Institute of International Affairs.
- Singer, A. – Schröder, O. – Pabst, C. – Munack, A. – Bünger, J. – Ruck, W. – Krahl, J. (2015) ”Aging studies of biodiesel and HVO and their testing as neat fuel and blends for exhaust emissions in heavy-duty engines and passenger cars.” *Fuel*, 153: 595–603.
- Sipilä, Esa – Lottonen, Johannes (2024) ”Selvitys hallitusohjelman uusiutuvien polttoainien jakeluvaihtoehtoja koskevien kirjausten vaikutuksista ja RED III -direktiivin kansallisesta toimeenpanosta”. AFRY Management Consulting Oy.

- Siskos, Pelopidas – Zazias, Georgios – Petropoulos, Apostolos – Evangelopoulou, Stavroula – Capros, Pantelis (2018) ”Implications of delaying transport decarbonisation in the EU: A systems analysis using the PRIMES model.” *Energy Policy*, 121: 48–60.
- Siskos, Pelopidas – Moysoglou, Yannis (2019) ”Assessing the impacts of setting CO₂ emission targets on truck.” *Transportation Research Part A*, 125: 123–138. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2019.05.010>.
- SKAL ry (2024) *Kuorma-autot ja perävaunut Suomessa 2024: Korityypit, kokonaisuudet ja käyttövoimat*. Suomen Kuljetus ja Logistiikka SKAL ry.
- SKAL ry (2023a) *Millä energialla kuljetamme?* Suomen Kuljetus ja Logistiikka SKAL ry.
- SKAL ry (2023b) ”SKAL Käyttövoimakysely 2022: 30.11.–11.12.2022.”
- Smallbone, Andrew – Jia, Boru – Atkins, Penny – Roskilly, Anthony Paul (2020) ”The impact of disruptive powertrain technologies on energy consumption and carbon dioxide emissions from heavy-duty vehicles.” *Energy Conversion and Management: X*, 6: 1–20.
- Soam, Shveta – Hillman, Karl (2019) ”Factors influencing the environmental sustainability and growth of hydrotreated vegetable oil (HVO) in Sweden.” *Bioresource Technology Reports*, 7: 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2019.100244>.
- Solakivi, Tomi – Ojala, Lauri – Laari, Sini – Töyli, Juuso – Toivonen, Noora – Metsäaho, Veeti (2023) *Logistiikkaselvitys 2023*. Turun kauppakorkeakoulun julkaisu.
- Sporkmann, Jan – Liu, Yang – Spinler, Stefan (2023) ”Carbon emissions from European land transportation: A comprehensive analysis.” *Transportation Research Part D*, 121: 1–20.
- St1 (2024) *HVO-Diesel. Tankattavissa lähes 40 asemalla*. 23.11. <https://www.st1.fi/yrietyksille/tuotteet-ja-palvelut/polttonesteet/dieselit-ja-adblue/hvodiesel>.
- Statista (2025) ”Lithium-ion battery price worldwide from 2013 to 2024, with a forecast for 2025 (in 2024 U.S. dollars per kilowatt-hour)” haettu 18.04.2025 <https://www.statista.com/statistics/883118/global-lithium-ion-battery-pack-costs/>.

- Statista (2021) "Refinery capacity of cobalt worldwide in 2021, by leading country." *Statista: Chemicals & Resources: Mining, Metals & Minerals*. <https://www.statista.com/statistics/339798/annual-cobalt-refinery-capacity-by-country>.
- Stettler, Marc E.J. – Woo, Mino – Ainalis, Daniel – Achurra-Gonzalez, Pablo – Speirs, Jamie – Cooper, Jasmin – Lim, Dong-Ha – Brandon, Nigel – Hawkes, Adam (2023) "Review of Well-to-Wheel lifecycle emissions of liquefied natural gas heavy goods vehicles." *Applied Energy*, 333. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.120511>.
- Suarez-Bertoa, Ricardo – Pechout, Martin – Vojtišek, Michal – Astorga, Covadonga (2020) "Regulated and Non-Regulated Emissions from Euro 6 Diesel, Gasoline and CNG Vehicles under Real-World Driving Conditions." *Atmosphere*, 1–18.
- Suarez-Bertoa, Ricardo – Mendoza-Villafuerte, Pablo – Bonnel, Pierre – Lilova, Velizara – Hill, Leslie – Perujo, Adolfo – Astorga, Covadonga (2016) "On-road measurement of NH₃ and N₂O emissions from a Euro V heavy-duty vehicle." *Atmospheric Environment*, 139: 167–175.
- Suomen ilmastopaneeli (2022) *Tieliikenteen kansallisen päästökaupan toteuttaminen ja vaikutukset*. Suomen ilmastopaneelin raportti 4/2022.
- Suomen Pankki (2025) Euriborkorot päivittäin. https://www.suomenpankki.fi/fi/tilastot/taulukot-ja-kuviot/korot/kuviot/korot_kuviot/euriborkorot_pv_chrt_fi/.
- Takman, Johanna – Andersson-Sköld, Yvonne (2021), "A framework for barriers, opportunities, and potential solutions for renewable energy diffusion: Exemplified by liquefied biogas for heavy trucks", *Transport Policy*, 110: 150–160, <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2021.05.021>.
- Tanvir, Shams – Un-Noor, Fuad – Boriboonsomsin, Kanok – Gao, Zhiming (2021), "Feasibility of Operating a Heavy-Duty Battery Electric Truck Fleet for Drayage Applications", *Transportation Research Record*, 2675: 258–268, <https://doi.org/10.1177/0361198120957325>.
- Teichert, Olaf – Link, Steffen – Schneider, Jakob – Wolff, Sebastian – Lienkamp, Markus (2023), "Techno-economic cell selection for battery-electric long-haul trucks", *eTransportation*, 16: 1–15, <https://doi.org/10.1016/j.etrans.2022.100225>.
- Tesla (2024), *Semi*, <https://www.tesla.com/semi>.

- The U.S. Department of Energy (2024), *GREET*, haettu 22.11.2024, <https://www.energy.gov/eere/greet>.
- Tilastokeskus (2022), *Kuorma-autoliikenteen kustannusindeksi (2020=100). Menetelmäseloste*, Tilastokeskus.
- Tilastokeskus (2024a), *Energian kokonaiskulutus energialähteittäin 1970–2023*, 16.12.2024, https://stat.fi/tup/suoluk/suoluk_energia.html#kokonaiskulutus.
- Tilastokeskus (2024b), ”12ge -- Polttonesteiden kuluttajahinnat (sisältää alv:n), 1988M01-2024M07” *StatFin*, 16.12.2024, https://pxdata.stat.fi/PXWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin__ehi/statfin_ehi_pxt_12ge.px.
- Tilastokeskus (2024c), ”Sähkön hinta kuluttajatyypeittäin, 2008M01–2024M09”, *StatFin*, 25.12.2024, https://pxdata.stat.fi/PxWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin__ehi/statfin_ehi_pxt_13rb.px/table/tableViewLayout1/.
- Tilastokeskus (2024d), *Kuorma-autoliikenteen kustannusindeksi (2020=100)*.
- Tilastokeskus (2025a), *Kotimaan kuorma-autoliikenteen suoritteet kuljetusetäisyyden mukaan, ilman maa-aineksia*, haettu 23.03.2025, https://pxdata.stat.fi/PxWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin__kttav/statfin_kttav_pxt_117a.px/table/tableViewLayout1/.
- Tilastokeskus (2025b), *Autojen ensirekisteröinnit käyttövoiman mukaan muuttujina Ajo-neuvoluokka, Käyttövoima, Vuosi ja Tiedot*, 23.03.2025, https://pxdata.stat.fi/PxWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin__merek/statfin_merek_pxt_11ck.px/table/tableViewLayout1/.
- TLK Energy (2025), *Calculate the density of air*, 02.02.2025, <https://tlk-energy.de/en/tools/air-density>.
- Tol, Dennis – Frateur, Thomas – Verbeek, Maarten – Riemersma, Iddo – Mulder, Hans (2022), *Techno-economic uptake potential of zero-emission trucks in Europe*, TNO Report, https://www.transportenvironment.org/uploads/files/202210_TNO_-techno_economic_uptake_potential_of_zero_emission_trucks_in_Europe.pdf.
- Traficom (2019), ”Pitkät rekat yleistyvät liikenteessä”, 15.01.2019, <https://www.traficom.fi/fi/ajankohtaista/pitkat-rekat-yleistyvat-liikenteessa>.

- Traficom (2021a), *Hankintatukimalli – sähkökäyttöiset kuorma-autot*, Muistio.
- Traficom (2021b), *Hankintatukimalli – Kaasukäyttöiset kuorma-autot*, Muistio.
- Traficom (2024a), *Ajoneuvojen ensirekisteröinnit maakunnittain 2001–2024*,
https://trafi2.stat.fi/PXWeb/pxweb/fi/TraFi/TraFi__Ensirekisteroinnit/030_ensirek_tau_103.px/.
- Traficom (2024b), *Tavaraliikenne Suomessa*, 29.10.2024, <https://tieto.traficom.fi/fi/tilastot/tavaraliikenne-suomessa>.
- Traficom (2024c), *Hae hankintatukea sähkö-, vety- ja kaasukäyttöiselle kuorma-autolle*
<https://www.traficom.fi/fi/hankintatuet>.
- Traficom (2025), *Kuljetusmuotojen roolit tavaraliikenteessä*, 27.01.2025,
<https://tieto.traficom.fi/fi/tilastot/kuljetusmuotojen-roolit-tavaraliikenteessa>.
- Transport & Environment (2021a), *LNG Trucks: A Dead End Bridge*, Brussels:
Transport & Environment.
- Transport & Environment (2021b), *Unlocking Electric Trucking in the EU: Recharging Along Highways*, Transport & Environment.
- Transport & Environment (2022), *Electric trucks take charge*, Berlin: Transport & Environment.
- Transport & Environment (2023), *Fully charged for 2030: Enough infrastructure for more electric trucks in 2030*, Transport & Environment.
- Transport & Environment (2024), *The advanced and waste biofuels paradox: Availability and sustainability of advanced and waste biofuels*, Transport & Environment.
- Tsakiris, Aristeidis (2019), "Analysis of hydrogen fuel cell and battery efficiency", *Paper presented at World Sustainable Energy Days 2019. Young Energy Researchers Conference*, Wels, Austria.
- Työ- ja elinkeinoministeriö (2023a), *TEM048:00/2023: Hallituksen esitys jakeluvolvoitteen alentamista vuonna 2024*, 28.12.2023, <https://tem.fi/hanke?tunnus=TEM048:00/2023>.
- Työ- ja elinkeinoministeriö (2023b), "Lakiesitys: Liikennepolttoaineiden jakeluvolvoite 13,5 % myös ensi vuonna", *Valtioneuvosto*, 09.10.2023,

<https://valtioneuvosto.fi/-/1410877/lakiesitys-liikennepolttoaineiden-jakeluvelvoite-13-5-myos-ensi-vuonna->.

Työ- ja elinkeinoministeriö (2024), ”Jakeluvelvoite nousee ensi vuonna maltillisesti 16,5 prosenttiin”, *Valtioneuvosto*, 19.12.2024, <https://valtioneuvosto.fi/-/1410877/jakeluvelvoite-nousee-ensi-vuonna-maltillisesti-16-5-prosenttiin>.

Työterveyslaitos (2023), *OVA-ohjeet*.

U.S. Department of Energy (2024), *Office of Energy Efficiency & Renewable Energy*, 06.12.2024, <https://www.fueleconomy.gov/feg/coldweather.shtml>.

Ulkoministeriö (2002), ”Euroopan unioni ratifioi Kioton pöytäkirjan yksimielisesti”, *Tiedotteet*, 31.05.2002, https://um.fi/tiedotteet/-/asset_publisher/ued5t2wDmr1C/content/euroopan-unioni-ratifioi-kioton-poytakirjan-yksimielisesti.

Ulleberg, Øystein – Hancke, Ragnhild (2020), ”Techno-economic calculations of small-scale hydrogen supply systems for zero emission transport in Norway”, *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(2): 1201–1211, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.05.170>.

UNECE (2021), *Technology Brief: Hydrogen*, Geneva: United Nations Economic Commission for Europe.

Unglert, Martin – Bockey, Dieter – Bofinger, Christine – Buchholz, Bert – Fisch, Georg – Luther, Rolf – Müller, Martin – ym. (2020), ”Action areas and the need for research in biofuels”, *Fuel*, 268: 117227, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117227>.

Valtioneuvosto (2023), *Valtioneuvoston periaatepäätös vedystä*, Työ- ja elinkeinoministeriö.

Venäläinen, Pirjo (2019), *Puutavara- ja hakeajoneuvojen pidentämisen vaikutukset: Pidentetty raportti, Metsätehon raportti 246*, Vantaa.

Verohallinto (2023), *Sähkön, maakaasun, biokaasun, polttoturpeen, kivihiilen ja mäntyöljyn verotaulukot*, <https://www.vero.fi/yritykset-ja-yhteisot/verot-ja-maksut/valmisteverotus/sahkovero/verotaulukot/>.

- Verohallinto (2024), *Nestemäisten polttoaineiden valmistevero*, 15.11., <https://www.vero.fi/yritykset-ja-yhteisot/verot-ja-maksut/valmisteverotus/nestemaiset-polttoaineet/>.
- Viinikainen, Tytti – Ilomäki, Riku – Rauhala, Anna-Maria (2023), *Selvitys vaihtoehtoisilla käyttövoimilla toimivien kuorma- ja pakettiautojen hankintatukien vaikutuksista*, Traficom.
- Volvo Trucks (2023a), ”Fact Sheet: Engine Version G13S500A EU6SCR”.
- Volvo Trucks (2023b), ”Premiere: Volvo Trucks tests hydrogen-powered electric trucks on public roads”, *Volvo Trucks Web site*, 08.05., <https://www.volvotrucks.com/en-en/news-stories/press-releases/2023/may/volvo-trucks-tests-hydrogen-powered-electric-trucks-on-public-roads.html>.
- Volvo Trucks (2024a), ”Breakthrough: Volvo to launch electric truck with 600 km range”, 03.09., <https://www.volvotrucks.com/en-en/news-stories/press-releases/2024/sep/breakthrough-volvo-to-launch-electric-truck-with-600-km-range.html>.
- Volvo Trucks (2024b), ”Volvo to launch hydrogen-powered trucks”, *Volvo Trucks Web site*, 23.05., <https://www.volvotrucks.com/en-en/news-stories/press-releases/2024/may/Volvo-to-launch-hydrogen-powered-trucks.html>.
- Volvo Trucks (2025), ”Volvo FH. The iconic long-haul truck”. <https://www.volvotrucks.co.uk/en-gb/trucks/models/volvo-fh.html>.
- Widuto, Agnieszka (2023), *Revision of the Renewable Energy*, European Parliamentary Research Service.
- Williams, Martin – Minjares, Ray (2016), *A technical summary of Euro 6/VI vehicle emission standards*, The International Council on Clean Transportation.
- World Bank (2021), *Cobalt in the Democratic Republic of Congo*, <https://documents1.worldbank.org/curated/en/099500001312236438/pdf/P1723770a0f570093092050c1bddd6a29df.pdf>.
- Xu, H. – Lee, U. – Wang, M. (2020), ”Life-cycle energy use and greenhouse gas emissions of palm fatty acid distillate derived renewable diesel”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 134: 1–17, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110144>.

- Yang, Mingye – Hu, Song – Yang, Fuyuan – Fang, Chuan – Deng, Wei – Lu, Zhenghua – Bu, Yu (2023), "Theoretical analysis on energy saving of cold energy utilization system for a liquid hydrogen heavy-duty truck", *Applied Thermal Engineering*, 219: 1–12, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.119509>.
- Yeh, Sonia (2007), "An empirical analysis on the adoption of alternative fuel vehicles: The case of natural gas vehicles", *Energy Policy*, 35: 5865–5875.
- Yhdistyneet Kansakunnat (1992), "United Nations Framework Convention on Climate Change".
- Yhdistyneet Kansakunnat (1998), "Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change".
- Yhdistyneet Kansakunnat (2015), "Paris Agreement".
- Yhdistyneet Kansakunnat (2024a), "What is Climate Change?", haettu 22.11.2024, <https://www.un.org/en/climatechange/what-is-climate-change>.
- Yhdistyneet Kansakunnat (2024b), *Conferences: Environment and Development*, haettu 28.3.2024, <https://www.un.org/en/conferences/environment>.
- Yle (2024), "Pakkaset jäädyttävät uusissa dieselautoissa pakollisen lisäaineen – korjaamoyrittäjä: Järjestelmää ei ole suunniteltu arktisiin oloihin", *Yle*, 16.01., <https://yle.fi/a/74-20069217>.
- Yuan, Zhiyi – Ou, Xunmin – Peng, Tianduo – Yan, Xiaoyu (2019), "Life cycle greenhouse gas emissions of multi-pathways natural gas vehicles in China considering methane leakage", *Applied Energy*, 253: 1–15, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113472>.
- Yun, Sanghyun – Yun, Jinwon – Han, Jaeyoung (2023), "Development of a 470-Horsepower Fuel Cell–Battery Hybrid Xcient Dynamic Model Using Simscape™", *Energies*, 16: 1–21.
- Zacharof, Nikiforos – Fontaras, Georgios – Ciuffo, Biagio – Tansini, Alessandro – Prado-Rujas, Iker (2021), "An estimation of heavy-duty vehicle fleet CO2 emissions based on sampled data", *Transportation Research Part D*, 94: 1–18, <https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.102784>.

Zhang, Xizhao – Lin, Zhenhong – Crawford, Curran – Li, Shunxi (2022), "Techno-economic comparison of electrification for heavy-duty trucks in China by 2040", *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 102: 1–19.

Zhou, Yuanrong – Searle, Stephanie (2022), *Cost of renewable hydrogen produced on-site at hydrogen refueling stations in Europe*, International Council on Clean Transportation.