

## ASIAKASRAPORTTI

VTT-CR-00303-22



# Paikallisliikenteen puhtaat käyttövoimat nyt ja tulevaisuudessa

Kirjoittajat: Mikko Pihlatie  
Saara Viik  
Jeremias Hopsu

Luottamuksellisuus: Julkinen

Versio: 25.3.2022



<b>Raportin nimi</b>	
Paikallisliikenteen puhtaat käyttövoimat nyt ja tulevaisuudessa	
<b>Asiakkaan nimi, yhteyshenkilö ja yhteystiedot</b>	<b>Asiakkaan viite</b>
Helsingin seudun liikenne -kuntayhtymä (HSL), Ville Uusi-Rauva Opastinsilta 6A / PL 100, 00077 Helsinki, Suomi	VTT-174304-21
<b>Projektin nimi</b>	<b>Projektin numero/lyhytnimi</b>
HOCS: Paikallisliikenteen voimalinjat 2021 ja tulevaisuudessa	131698/HOCS_Powertrains
<b>Raportin laatija(t)</b>	<b>Sivujen/liitesivujen lukumäärä</b>
Mikko Pihlatie, Saara Viik, Jeremias Hopsu	32/-
<b>Avainsanat</b>	<b>Raportin numero</b>
Sähköbussi, vetybussi, akku, polttokenno	VTT-CR-00304-22
<b>Tiivistelmä</b>	
<p>Helsingin Seudun Liikenne HSL tukee kansallisten ja pääkaupunkiseudun liikenteen ilmastotavoitteiden saavuttamista kehittämällä joukkoliikennepalveluista päästöttömiä. Vuoteen 2035 mennessä tavoitteena on tarjota joukkoliikennepalvelut täysin päästöttömästi. Tässä raportissa tarkastellaan joukkoliikenteen nollapäästöisiä käyttövoimavaihtoehtoja sähköä ja vetyä ja niiden soveltuvuutta joukkoliikenteen käyttövoimiksi.</p> <p>Uusista käyttövoimista erityisesti sähkö on tällä hetkellä voimakkaassa kehitysvaiheessa ja monissa kaupungeissa käyttöönottovaiheessa markkinalähtöisesti. Ohjaava lainsäädäntö on kehittynyt teknologian rinnalla voimakkaasti: ajoneuvojen päästörajat, puhtaiden ajoneuvojen hankintadirektiivi ja vaihtoehtoisten käyttövoimien infrastruktuurin direktiivi/asetus edistävät kaikki osaltaan liikenteen vihreää siirtymää.</p> <p>Voimakas kasvuvaihe sekä vaatii että ruokkii kehitystä useilla rintamilla: teknologia kehittyy ja on monilta osin jo vakiintunut, uusien ratkaisujen hinnat laskevat siirryttäessä massatuotantoon ja avoimeen markkinaan, uusia liiketoiminta- ja palvelumalleja ja alustoja tarvitaan ja niitä syntyy. Loppukäyttäjät saavat käyttökokemuksia uusista tuotteista, käyttövoimista ja lisäarvoa tuottavista palveluista. Sähköistykselle on keskeistä tarpeenmukaisen latausinfrastruktuurin rakentuminen mahdollistamaan sähköisen kaluston operoinnin. Sähköbussien latausinfrastruktuuria on rakennettu toteutuneiden sähköistyshankkeiden tarpeisiin jo eri puolilla Suomea. Suomen tasolla katsottuna, kaupunkien valmius edetä laajempaan käyttöönottoon ja linja-autoista muihin käyttötapauksiin vaihtelee.</p> <p>Sähkön rinnalla polttokennot ja vety ovat monilla tahoilla aktiivisen tarkastelun kehityksen ja toteutettavuuden arvioinnin kohteena. Euroopan unionin puiteohjelmissa on panostettu merkittävästi polttokennobussien markkinademonstraatioihin. Samalla vetytalouden ja infrastruktuurin rakentumisesta tulevan vuosikymmenen aikana on aktiivista keskustelua. Vetybusseista on kuitenkin toistaiseksi vähän käyttökokemuksia todellisissa olosuhteissa korkean palvelu- ja vaatimustason joukkoliikenteessä.</p> <p>Työssä tarkastellaan akkusähkö- ja vetypolttokennopohjaisten voimalinjojen vahvuuksia, heikkouksia ja riskejä, sekä voimalinjojen soveltuvuutta erilaisiin paikallisliikenteen liikennetyyppeihin HSL:n alueella lähitulevaisuudessa sekä tehdään arvio pidemmän aikavälin kehityksestä. Työ analysoi uusia voimalinjavaihtoehtoja paikallisliikenteessä ja pyrkii selvittämään nykyhetkessä parhaiten HSL:n tavoitteisiin sopivat ratkaisut ja tulevaisuuden potentiaaliset vaihtoehdot. Voimalinjojen arvioinnissa hyödynnetään herkkyyssanalyysejä, jossa muodostetaan eri skenaarioita kuvaavia käyttötapauksia. Eri voimalinjojen kehityksestä ja pidemmän tähtäimen tulevaisuuden potentiaalista tehdään arvioihin pohjautuvat herkkyystarkastelut.</p> <p>Vertailevan analyysin perusteella voidaan todeta, että tällä hetkellä sähköbussit ovat kokonaisratkaisuna sekä teknologisen että markkinavalmiuden osalta merkittävästi polttokennobusseja edellä. Kaupalliset sähköbussihankinnat toteutuvat markkinalähtöisesti ja Euroopan tasolla sähköbussien markkinaosuus on kasvava. Samaan aikaan vetybussien ensimmäiset järjestelmätason kokeiluhankkeet ovat käynnissä pääosin Keski-Euroopassa ja järjestelmätason toimivuus joukkoliikenteen käyttövoimana on isossa kuvassa todentamatta. Polttokennoteknologian lisäksi keskeinen vaatimus on vetytankkausinfrastruktuurin rakentuminen sekä ylipäättään liikennevedyn saatavuus ja hinta. Suurimmat riskit ja epävarmuudet vety-polttokennojärjestelmiin liittyvät juuri vedyn ja infrastruktuurin saatavuuteen.</p> <p>Analyyysissä on arvioitu ennakoitua teknologioiden ja markkinan kehitystä seuraavan kymmenen vuoden jaksolla. Sähköbussit näyttävät omistajan kokonaiskustannuksen perusteella edullisimmalta vaihtoehdolta verrattuna sekä dieseliin että vetyyn. Sähkön rajoitteita ovat akkukapasiteetin rajoittama operoitavuus ja ajokantama korkeilla käyttöasteilla, sekä nollapäästöinen lämmönhallinta talvella - näitä voidaan hallita pikalatauksella ja nollapäästöisillä ajomatkan jatkailla. Vetybussit rinnastuvat tällä hetkellä pitkälti dieseliin ja tulevat vuosikymmenen aikana olemaan kilpailukykyisiä dieselin kanssa, mikäli infrastruktuurin saatavuus ja markkinan kypsyys kehittyvät suotuisasti. Sähköbusseihin verrattuna vetybussit nousevat vaihtoehtoksi pisimmillä linjoilla ja korkeilla käyttöasteilla, jos vetyinfrastruktuurin toteutus osoittautuu helpommaksi kuin pikalatauksen.</p>	
<b>Luottamuksellisuus</b>	Julkinen
Espoo 25.3.2022	
<b>Laatija</b>	<b>Tarkastaja</b>
Mikko Pihlatie	Jari Ihonen
Jeremias Hopsu	Mikaela Ranta
Saara Viik	



**VTT:n yhteystiedot**

mikko.pihlatie@vtt.fi

**Jakelu (asiakkaat ja VTT)**

HSL, VTT

*VTT:n nimen käyttäminen mainonnassa tai tämän raportin osittainen julkaiseminen on sallittu vain  
Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy:ltä saadun kirjallisen luvan perusteella.*



## Hyväksyminen

### TEKNOLOGIAN TUTKIMUSKESKUS VTT OY

Päivämäärä:

28 March 2022

Allekirjoitus:

DocuSigned by:  
*Rafael Aman*  
BE346D6FEFB647B...

Nimi:

Rafael Aman

Asema:

Research Team Leader



## Sisällysluettelo

---

1. Toimeksiannon kuvaus ja tavoitteet .....	5
2. Toteutus .....	6
2.1 Projektiorganisaatio .....	6
3. Tulokset.....	7
3.1 Vähä- ja nollapäästöiset käyttövoimavaihtoehdot .....	7
3.2 Bussiliikenteen vaatimukset ja käyttötapaukset .....	9
3.3 Sähkö- ja vetypolttokennobussien markkinavalmius .....	11
3.3.1 Sähköbussit .....	11
3.3.2 Vety-polttokennobussit .....	13
3.4 Sähkö- ja vetypolttokennobussien kehitysnäkymät ja riskit .....	16
3.5 Uusien käyttövoimien soveltuvuusarviot .....	18
3.5.1 Menetelmä ja lähtötiedot .....	18
3.5.2 Tulokset .....	22
4. Johtopäätökset ja yhteenveto .....	29
Lähdeviitteet .....	31



## 1. Toimeksiannon kuvaus ja tavoitteet

---

Kansallinen fossiilittoman liikenteen tiekarttatyö viitoittaa tietä siirtymälle fossiilisista polttoaineista kohti vaihtoehtoisia käyttövoimia. Merkittävä osuus tieliikennesektorin päästöistä tulee erilaisista yritysten hankkimista ja kaupallisessa käytössä olevista ajoneuvoista monissa eri kokoluokissa henkilöautoista aina raskaisiin maantiekuljetusten ajoneuvoyhdistelmiin. Raskaiden hyötyajoneuvojen ryhmässä joukkoliikenteen kaupunkibussit ovat ensimmäisenä ja nopeimmin siirtymässä perinteisestä dieselistä nollapäästöisiin käyttövoimiin. Suomella ja pääkaupunkiseudun kunnilla on kunnianhimoiset hiilineutraalisuuden ja kestävä kehityksen tavoitteet. Suomi haluaa olla hiilineutraali vuonna 2035 ja HSL alueen kolme suurinta kuntaa jo vuonna 2030. Näiden tavoitteiden saavuttaminen vaatii määrätietoisia toimia. HSL:n tavoitteenamme on vähentää vuoteen 2025 mennessä joukkoliikenteen CO<sub>2</sub> päästöjä 90 % vuoteen 2010 verrattuna. Vuoteen 2035 mennessä tavoitteena on tarjota joukkoliikennepalvelut täysin päästöttömästi. Vähähiilisuuden ja nollapäästöisyyden lisäksi HSL:n strategiassa vuosille 2022-2025 nostetaan keskiöön joukkoliikenteen korkea käyttöaste, kustannustehokkuus ja kokonaistaloudellisuus.

Selkeästi vahvin uusi kaupunkilinja-autojen käyttövoima tämän hetken markkinassa on sähkö. Hyvin määriteltyjen operoinnin käyttötapausten ja kaluston korkean käyttöasteen myötä on selviä merkkejä siitä, että sähköistyksen siirtymä voidaan toteuttaa kustannustehokkaasti ja markkinalähtöisesti ja saavuttaa jopa säästöjä joukkoliikenteen kustannuksissa.

Uusista vaihtoehtoisista käyttövoimista erityisesti sähkö on tällä hetkellä voimakkaassa kehitysvaiheessa. Ohjaava lainsäädäntö on kehittynyt teknologian rinnalla voimakkaasti: ajoneuvojen päästöraajat, puhtaiden ajoneuvojen hankintadirektiivi ja vaihtoehtoisten käyttövoimien infrastruktuurin direktiivi/asetus edistävät kaikki osaltaan liikenteen vihreää siirtymää.

Voimakas kasvuvaihe sekä vaatii että ruokkii kehitystä useilla rintamilla: teknologia kehittyä, perusvalinnat teknologioissa vakiintuvat, uusien ratkaisujen hinnat laskevat siirryttäessä massatuotantoon ja avoimeen markkinaan, uusia liiketoiminta- ja palvelumalleja ja alustoja tarvitaan ja niitä syntyy. Loppukäyttäjät saavat käyttökokemuksia uusista tuotteista, käyttövoimista ja lisäarvoa tuottavista palveluista. Sähköistykseksi on keskeistä tarpeenmukaisen latausinfrastruktuurin rakentuminen mahdollistamaan sähköisen kaluston operoinnin. Sähköbussien latausinfrastruktuuria on rakennettu toteutuneiden sähköistyshankkeiden tarpeisiin jo eri puolilla Suomea. Suomen tasolla katsottuna, kaupunkien valmius edetä laajempaan käyttöönottoon ja linja-autoista muihin käyttötapauksiin vaihtelee.

Sähkön rinnalla polttokennot ja vety ovat monilla tahoilla aktiivisen tarkastelun kehityksen ja toteutettavuuden arvioinnin kohteena. Euroopan unionin puiteohjelmissa on panostettu merkittävästi polttokennobussien markkinademonstraatioihin. Samalla vetystalouden ja infrastruktuurin rakentumisesta tulevan vuosikymmenen aikana on aktiivista keskustelua.

Työssä tarkastellaan akkusähkö- ja vetypolttokennopohjaisten voimalinjojen vahvuuksia, heikkouksia ja riskejä, sekä voimalinjojen soveltuvuutta erilaisiin paikallisliikenteen liikennetyyppeihin HSL:n alueella lähitulevaisuudessa sekä tehdään arvio pidemmän aikavälin kehityksestä. Työ analysoi uusia voimalinja-vaihtoehtoja paikallisliikenteessä ja pyrkii selvittämään nykyhetkessä parhaiten HSL:n tavoitteisiin sopivat ratkaisut ja tulevaisuuden potentiaaliset vaihtoehdot. Voimalinjojen arvioinnissa hyödynnetään herkkyysanalyysiä, jossa muodostetaan eri skenaarioita kuvaavia käyttötapauksia. Eri voimalinjojen kehityksestä ja pidemmän tähtäimen tulevaisuuden potentiaalista tehdään arvioihin pohjautuvat tilastolliset tarkastelut.

Akkusähkön osalta tarkastellaan käytön aikaista ja varikolla tapahtuvaa latausta. Vetypolttokennojen osalta käytettävä vety on EU-direktiivin ((EU) 2018/2001) ehdot täyttävää uusiutuvaa vetyä josta jatkossa käytetään nimeä vihreä vety. Voimalinjojen soveltuvuuden eri liikennetyyppeihin ja eri kalustoon selvittämiseksi HSL:n tulevaisuuden linjastosuunnitelmista tunnistetaan kolme eri linjastotyyppiä (kevyet liityntälinjat, pitkät seutulinjat ja raskaat runkolinjat) ja kaikki alueella yleisimmin käytössä olevat kalustotyypit (12m, 15m ja 18m).



## 2. Toteutus

---

Työtä ohjasi HSL:n nimeämä ohjausryhmä. Työn tavoitteena on tuoda selvästi esille akkusähköisen ja vetypolttokennopohjaisen voimalinjan soveltuvuus HSL:n alueen paikallisliikenteeseen nyt ja lähitulevaisuudessa, sekä näkemyksiä pidemmän aikavälin kehityksestä.

Työ tehtiin loppuvuodesta 2021 alkuvuoteen 2022.

### 2.1 Projektiorganisaatio

Projektipäällikkö: Tommi Muona

Projektin johtoryhmä: Ville Uusi-Rauva, Ville Juselius, Petri Saari, Hannu Villman

Raportin kirjoittajat: Mikko Pihlatie, Saara Viik, Jeremias Hopsu

### 3. Tulokset

#### 3.1 Vähä- ja nollapäästöiset käyttövoimavaihtoehdot

Tarkastelun lähtökohtana on vertailla sähköä ja ei-biologista alkuperää olevia käyttövoimavaihtoehtoja (Renewable Fuels of Non-Biological Origin, RFNBO) linja-autoille. Näitä ovat vihreä RED2-direktiivin ehdot täyttävä vety ja siitä valmistetut nestemäiset sähköpolttoaineet. Kun tarkastellaan näiden käyttövoimavaihtoehtojen energiapolun hyötysuhdetta koko ketjussa, ns. well-to-wheel (WTW), nähdään että suoran sähköistytyn polku on ylivoimaisesti energiatehokkain, kts. Taulukko 1. Verrattuna suoran sähköistytyn ajoneuvon, saman liikennesuorituksen saavuttamiseksi tarvitaan noin kolminkertainen määrä uusiutuvaa sähköä, jos käyttövoimana on vety, tai noin nelinkertainen määrä sähköä, jos käytetään nestemäistä Fischer-Tropsch -synteesin kautta tuotettua sähködieselä. Sekä energiatehokkuuden että päästöjen osalta voi taulukon 1 käyttövoimille tulla lisäksi eroja vihreän sähkön ja vedyn tuotannon sekä latauksen ja tankkauksen ajan ja paikan perusteella. Vertailussa ei ole kattavasti huomioitu ajoneuvon matkustaja- tai rahtitilan tarvitsemää lämmitystä mikä joissakin tapauksissa muuttaa vertailua.

*Taulukko 1: Ei-biologista alkuperää olevien liikenteen käyttövoimavaihtoehtojen ja suoran sähköistytyn energiatehokkuusvertailu huomioiden vain ajoenergia.*

	Suora sähköistys	Vety (nesteytetty)	Vety (paineistettu*)	e-diesel	e-metaani (nesteytetty)	e-metaani (paineistettu)
Uusiutuvaa sähköä	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %
AC-DC muunnos		95 %	95 %	95 %	95 %	95 %
Elektrolyysi		75 %	75 %	75 %	75 %	75 %
Hiilidioksidin/typen talteenotto ja polttoainesynteesi				63 %	80 %	80 %
Paineistus / nesteytys		80 %	90 %		80 %	90 %
Kuljetus, varastointi ja jakelu	94 %	90 %	80 %	95 %	90 %	85 %
Polttoainetuotannon, kuljetuksen ja jakelun tehokkuus (WTT)	94 %	51 %	51 %	43 %	41 %	44 %
AC/DC muunnos ja lataus	93 %					
Akuston hyötysuhde	94 %					
Vety/DC muunnos		45 %	45 %			
DC/AC muunnos	95 %	95 %	95 %			
Moottorin hyötysuhde	90 %	90 %	90 %	45 %	38 %	38 %
Ajoneuvon tehokkuus (TTW)	75 %	38 %	38 %	45 %	38 %	38 %
<b>Kokonaistehokkuus (WTW)</b>	<b>70 %</b>	<b>20 %</b>	<b>20 %</b>	<b>19 %</b>	<b>16 %</b>	<b>17 %</b>

\* Paineistettu 350 bar, kuljetettu paikalle.

Taulukossa 1 on syytä huomioida, että etenkin arviot kuljetuksesta, varastoinnista ja jakelusta ovat suuntaa antavia, koska ovat riippuvaisia esimerkiksi kuljetusmatkan pituudesta. Myös eri elektrolyyserityypeillä on ominaiset hyötysuhteensa ja operointipaineensa, mitkä taas vaikuttavat suoraan paineistustarpeeseen.





Vedyn energiatiheys painoa kohden on lähes kolminkertainen dieseliin verrattuna (Taulukko 2). Koska vedyn tiheys on alhainen normaalipaineessa, sitä tulee paineistaa tai nesteyttää liikennekäyttöön. Ras-kaassa liikenteessä vety paineistetaan yleensä 350 bar (joissakin tapauksissa 700 bar) ja vetysäiliöiden kapasiteetti on noin 35 kg H<sub>2</sub>. Tällä varastolla vetybussien kantama on noin 350-400 km (kulutus noin 10 kgH<sub>2</sub>/100 km). Vetysäiliöitä lisäämällä kantamaksi voidaan kuitenkin saada jopa yli 500 km, jos säiliöille on tarpeeksi kattotilaa. Tarvittaessa voidaan varautua kahdenkin päivän operointiin yhdellä tankillisella. Nestemäisen vedyn käyttö ei vielä ole yleistä tieliikenteessä, mutta mahdollisesti tulevaisuudessa.

Vedyn hinta Keski-Euroopassa on noin 10 €/kg, tulevaisuuden tavoite on päästä lähelle 5 €/kg. Esimerkiksi FCHJU:n raportin mukaan isolla ajoneuvomäärällä voidaan päästä 7,2 €/kg. VTT:n omat laskelmat Suomen kannalta ovat samaa luokkaa, kun tarkastellaan keskitettyä vedyn tuotantoa (100 MW / tuotantolaitos) ja vedyn kuljetusta maanteitse. Vedyn osalta jaeltavan vedyn kokonaismäärällä on erittäin suuri vaikutus kustannustasoon. Siten tankkausasemia ei kannata hankkia pientä vedyn jakelumäärää varten.

Taulukko 2: Eri polttoaineiden ominaisuuksia bussikäytössä.

Käyttövoima	Energiatiheys kWh/kg (LHV)	Energiatiheys kWh/l	Diesel gallon equivalent <sup>1</sup>	Kulutus / 100 km	Lokaalit CO <sub>2</sub> -päästöt
Diesel	12,7	10,7		30-40 l	2,6 kg/l
Nestemäinen maakaasu (LNG)	14,9	6,2	1 kg = 0,38 DGE	30-40 kg	2,5 kg/kg
Paineistettu maakaasu (CNG, 250 bar)	14,9	2,5	1 kg = 0,36 DGE	30-40 kg	2,5 kg/kg
Nestemäinen vety (LH <sub>2</sub> )	33,3	2,4	1 kg = 0,9 DGE	8-10 kg	0
Paineistettu vety (GH <sub>2</sub> , 350 bar)	33,3	0,8	1 kg = 0,9 DGE	8-10 kg	0
Li-ioni akku	0,1-0,3 <sup>2</sup>	~0,4 <sup>3</sup>	1 kWh = 0,027 DGE	150-200 kWh	0

Vetysähköbussit tarvitsevat uutta infrastruktuuria toimiakseen. Suurimpina tulevaisuuden investointeina ovat vihreän vedyn tuotannon sekä kuljetusinfrastruktuurin luominen. Suomessa on tällä hetkellä saatavilla liikennelaadun vetyä yhdeltä toimijalta, ei vihreän vedyn tuotantoa eikä yhtään vetytankkausasemaa. Euroopassa on 149 toiminnassa olevaa vetytankkausasemaa, joista yli puolet sijoittuu Saksaan (91 kpl<sup>4</sup>). Ruotsissa vetytankkausasemia on tällä hetkellä 4 kpl. Eurooppaan on valmisteilla 41 uutta vetytankkausasemaa, joista lähin sijoittuu Viroon Pärnuun. Voidaan siis todeta, että vetytankkausasemien teknologia on valmista, mutta ne vaativat suuria investointeja ja toimivan vetyinfrastruktuurin ympärilleen. Vetytankkausaseman taloudellinen kannattavuus on vahvasti verrannollinen skaalaan ja käyttöasteeseen.

<sup>1</sup> <https://afdc.energy.gov/fuels/properties>

<sup>2</sup> <https://cleantechnica.com/2020/02/19/bloombergnef-lithium-ion-battery-cell-densities-have-almost-tripled-since-2010/>

<sup>3</sup> <https://www.epectec.com/batteries/cell-comparison.html>

<sup>4</sup> <https://h2.live/en/>



Kuva 1: Vetytankkausasemat Euroopassa (Lähde: [H2.live](https://www.h2.live)).

### 3.2 Bussiliikenteen vaatimukset ja käyttötapaukset

HSL:n rooli pääkaupunkiseudun joukkoliikenteen tilaajaorganisaationa mahdollistaa alueen bussiliikenteen kehittämisen strategisten tavoitteiden mukaisesti. Bussiliikenteen hankintamalli on joukkoliikennepalveluiden kilpailutus tilaaja-tuottajamallin mukaan. Keskeisiä tavoitteita joukkoliikenteelle laajemmassa maankäytön, asumisen ja liikenteen (ns. MAL-sopimus) kokonaisuudessa ovat vihreä siirtymä ja hyvä palvelutaso. Raideliikenteen ollessa jo sähköistä, on HSL:n strategiassa käyttövoimien osalta viime vuosina painottunut bussiliikenteen siirtymä nollapäästöisyyteen erityisesti sähköistyksen kautta.

HSL on kehittänyt bussiliikenteen hankinta- ja sopimusmalleja viime vuosien aikana mahdollistamaan vaihtoehtoisten käyttövoimien energiainfrastruktuurin, erityisesti sähköbussien latausjärjestelmien rakentaminen sähköisen bussiliikenteen tarpeiden mukaisesti. HSL on luonut tätä varten uuden hankinta- ja liiketoimintamallin 'lataus palveluna' (Charging as a service, CaaS), jonka kautta lähtökohtaisesti hankitaan kaupunki-infrastruktuuriin rakentuva käytönaikaisen latauksen infrastruktuuri bussiopeaattorien käyttöön. Nykyisessä HSL:n toimintamallissa käytönaikainen latausinfra ei ole bussiopeaattorien kesken yhteiskäyttöistä, vaan infrastruktuuri on rakennettu kohde- tai linjakohtaiseksi palvelemaan tiettyä sopimuksenalasta operointia. Samaa CaaS-mallia voidaan myös hyödyntää yhteiskäyttöisten bussivarikoiden osalta, jolloin järjestelmien yhteiskäyttöisyydestä sovitaan erikseen. HSL on kuvannut sähköbussien latauspolitiikan erillisessä dokumentissa.

Bussiliikenteen luotettavuudelle tilaajan toimesta asetetut vaatimukset ovat erittäin korkeat. Liikennöinti-sopimukseen on viety mittarit liikennepalvelun laadulle ja esimerkiksi ajamatta jääneet vuorot tai myöhästymiset aikataulusta voivat aiheuttaa operaattorille sopimussakkoja. Uusien käyttövoimien tullessa hankintojen kautta tuotantokäyttöön ei järjestelmätason vaatimuksista voida joukkoliikenteen palvelutason alenematta tinkiä. Samaa aikaan on sähköbussien osalta kaupallistamisvaihetta edeltäneiden tutkimus- ja kehityshankkeiden (ECV ja eBus) sekä esikaupallisen pilottihankkeen (ePELI) kohdalla havaittu, että uuden teknologian valmius ja toimivuus on todennettava käytännön innovaatioympäristöissä ennen kaupallistamisvaihetta. Tämä koskee bussikalustoa, lataus- tai tankkausinfrastruktuuria sekä lisäksi ja erityisesti näiden yhteensopivuutta ja toimintaa kokonaisuutena. Vetybussien osalta tällaisia eurooppalaisia todentamishankkeita on viime vuosina käynnistynyt, mutta järjestelmätasolla käyttökokemuksia ja valmiutta ei ole vielä riittävästi. Suomen pohjoiset olosuhteet asettavat kaikelle kalustolle ja järjestelmille erityisvaatimuksia esimerkiksi pakkaskestävyyden ja lämmityksen suhteen.



HSL-alueella on useiden eri bussioperaattorin kautta käytössä noin 1400 bussia sekä lisäksi varakalustoa. Liikennöinnissä erityyppistä kalustoa on seuraavasti: 12 m bussit (luokka A) 640 kpl, 15 m telibussit (luokka C) 440 kpl ja 18 m nivelbussit (luokka D) 56 kpl. Näiden lisäksi on pienehkö määrä pikkubusseja sekä vaihteleva määrä varakalustoa. Kalusto sijoittuu kuljetustarpeiden mukaisesti HSL:n osoittamille liikennöitäville linjoille, joita on alueella yhteensä 295 kpl. Linjastossa on kysynnän tarpeisiin monia erityyppisiä linjoja, kuten kantakaupungin linjoja, raideliikennettä ja solmupisteitä syöttäviä 'heilurilinjoja', seutulinjoihin sekä suuren kapasiteetin runkolinjoja. Tässä työssä tehtävää tarkastelua ja analysointia varten HSL-alueen bussilinjasto ja kalusto on jaettu kolmeen perusr ryhmään, joissa yhdistyy linjojen tyyppi ja niissä tyypillisesti käytettävä kalusto (kts. Taulukko 3). Kussakin ryhmässä on ajoneuvoja ja linjoja, joiden liikennesuorite vaihtelee - tyypillisesti uudemmallalla kalustolla ajetaan enemmän ja vanhempi kalusto siirtyy vaiheittain pienemmälle käyttöasteelle ja varalle.

Analysointia varten käytetyt keskimääräiset tai edustavat linjojen pituudet ja vaatimus kaluston yhtämittaisen keskeytymättömän operoinnin osalta. Sähkö- ja vetybussien osalta analyysissä oletetaan, että varikko- ja pikalatauksen sekä vetytankkauksen vuoksi ei ajoneuvojen kokonaismäärää jouduta kasvattamaan. Käytännössä kaikille analysoiduille sähkö- ja vetybusseille voi tulla operatiivisia rajoitteita liittyen toimintamatkaan (range) tai pikalataamiseen. Näitä voidaan hallita tilaajan toimesta esimerkiksi huomioimalla pikalatauksen vaatima päätepistelataukseen tarvittava aika autokierrossa, tai operaattorin toimesta kasvattamalla ajoneuvojen lukumäärää ja hyödyntämällä kysyntähuippujen välisiä aikoja välilataukseen. Sähköbussien osalta oletetaan, että bussioperaattori tarjoaa pikaladattavaa sähkökalustoa niille linjoille, joissa operointi sitä vaatii ja että tilaaja järjestää kyseisen pikalatausinfrastruktuurin. Mikäli varikkoladattavien sähköbussien tai vetybussien käyttöastetta halutaan nostaa yli kertalatauksen/tankkauksen mahdollistaman päiväsuoritteen, oletetaan että liikennöitsijä sijoittaa kaluston sellaisille linjoille, jotka mahdollistavat välilatauksen tai tankkauksen varikolla tai pikapysäköinnissä operoinnin lomassa.

Taulukko 3: Analysoidut linjatyyppit ja käyttötapaukset.

Linjan tyyppi	Edustava kalusto	Tyypillinen päiväsuorite km	Keskinopeus km/h	Keskimääräinen vuosisuorite km	Käyttötapaukset ja ajosykli
Syöttölinja	A	200-250	20	75000	Raideliikenteen syöttöliikenne, kantakaupunki
Seutulinja	C	320 (300-350)	30	90000	Kaupunkilinjat, säteittäiset linjat lähiöihin, seutulinjat
Runkolinja	C/D	420	15-25	126000	Runkolinjaliikenne



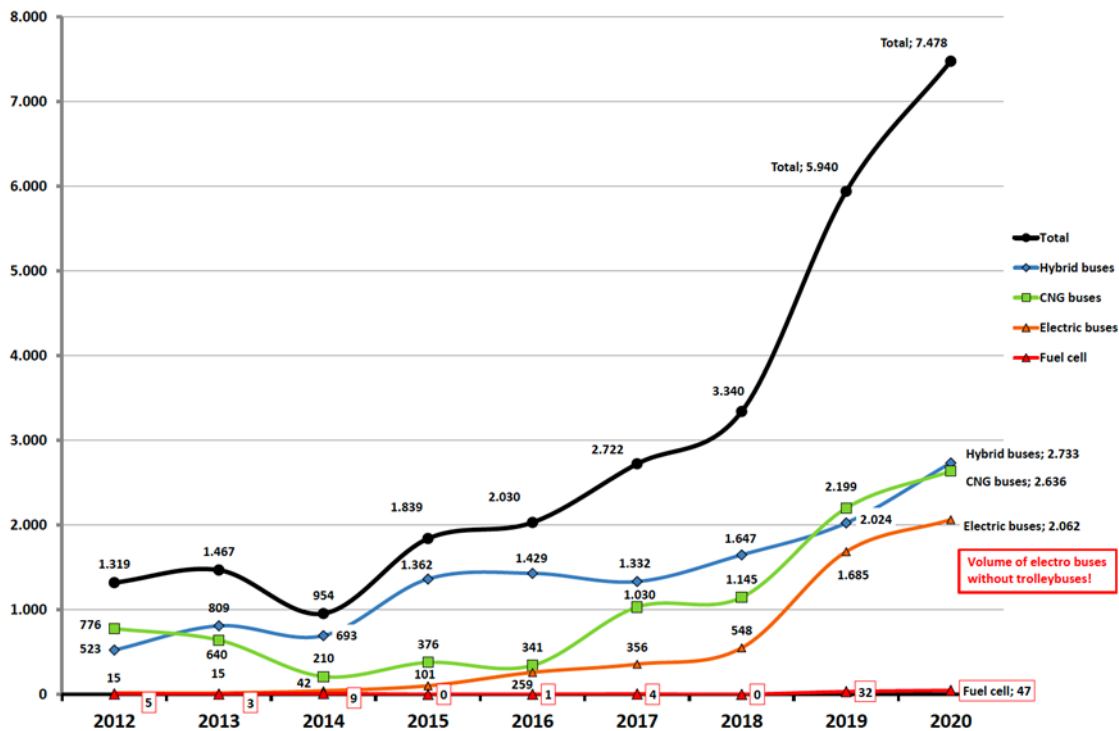
### 3.3 Sähkö- ja vetypolttokennobussien markkinavalmius

#### 3.3.1 Sähköbussit

Viimeisen vuosikymmenen aikana sähköbussien teknologia ja markkina on kehittynyt voimakkaasti. Monessa Euroopan maassa on siirrytty viime vuosina kokeilu- ja pilottihankkeista kaupallisen käyttöönoton vaiheeseen, jossa sähköbussuja tarjotaan ja valitaan sopimukseen kaupallisin perustein toteuttamaan kaupunkien ja metropolialueiden joukkoliikenteen päästö- ja vähähiilisyystavoitteita. Monissa tapauksissa tämä siirtymä tapahtuu jo kustannustehokkaasti ilman, että sopimusten hinta nousee.

Sähköbussien teknis-taloudelliseen kilpailukykyyn vaikuttaa omistajan kokonaiskustannusten dieselkalustosta poikkeava rakenne. Kuten kaikilla sähköajoneuvoilla, sähköbussien hankintahinta eli pääomakustannus on korkeampi kuin perinteisen kaluston. Sähköbussien hankintahintoihin tulevaisuudessa vaikuttaa laskevasti teknologian, mm. akut, vakiintuminen ja tuotannon skaalaedut ja toisaalta jonkin verran nostavasti suuntaus suurempiin akkukokoihin. Vastaavasti muuttuvat kustannukset ovat pienempiä sekä ylivoimaisen energiatehokkuuden että sähkön suhteellisen edullisuuden kautta, myös muut käyttö- ja huoltokulut arvioidaan perinteistä kalustoa alemmiksi. Tarpeenmukaisen latausinfrastruktuurin järjestäminen lisää maltillisesti pääomakulua. Omistajan kokonaiskustannusten kannalta sähköbussien kilpailukyky verrattuna perinteiseen kalustoon paranee kaluston käyttöasteen noustessa. [Pihlatie et al., 2014]

Linja-autojen vaihtoehtoisten käyttövoimien markkinan kehittymistä Euroopan tasolla (Länsi-Eurooppa ja Puola) on esitetty Kuva 2 [Chatrou 2020]. Tällä alueella rekisteröitiin vuonna 2020 yhteensä 2062 sähköbussia, kasvua edellisestä vuodesta 2019 oli 22%. Chatroun mukaan paineistetun metaanin (CNG) kasvusta kohdealueella oli noin 16%; tämä huomioiden tällä hetkellä sähkö- ja kaasubussit ovat Euroopassa käytännössä samalla tasolla. Kaiken kaikkiaan, vaihtoehtoiset käyttövoimat kattoivat Chatroun mukaan vuonna 2020 yli 53% kaupunkibussien markkinasta (vastaava luku 2019 oli 40%). IEA:n Global Electric Vehicle Outlook 2021 [IEA 2021] mukaan vuonna 2020 oli sähköbussien osuus kaikista Euroopassa rekisteröidyistä linja-autoista 4% ja Chatroun mukaan kaupunkibusseista 15,6%. Markkinaosuudeltaan johtavia sähköisten kaupunkibussien valmistajia vuonna 2020 olivat BYD (20%), Solaris (20%), Volvo (11%), BYD-Alexander Dennis (9%), Yutong (7%) ja VDL (6%) [Chatrou 2020].



Kuva 2: Linja-autojen (kaupunkiliikenne ja pidemmät matkat) vuotuinen markkina vaihtoehtoisille polttoaineille, Länsi-Eurooppa ja Puola (GVW yli 8 t). (Lähde: CHATROU 2020).

Puhtaiden ajoneuvojen direktiivi, kansalliset ja liikenteen tilaajien fossiilittomuusstrategiat ja Euroopan komission vuonna 2017 käynnistämä Clean Bus Europe Platform [CBEP 2022] eivät ole vielä täysin määräisesti ehtineet vaikuttaa markkinan muuttumiseen ja ohjata hankintoja, mutta suunta nollapäästöiseen joukkoliikenteeseen on selvä. CBEP-portaalista voidaan nähdä, että tammikuussa 2022 on avoimia hankintailmoituksia tai sulkeutuneita kilpailutuksia 76 kpl käyttövoimalla täyssähkö, 4 kpl käyttövoimalla ladataava hybridibussi, sekä 14 kpl käyttövoimalla polttokennot ja vety. Edellä on huomattava, että hankintaprosessien lukumäärästä ei voi päätellä hankittavien ajoneuvojen lukumäärää; sähköbussihankinnat ovat tyypillisesti olleet polttokennobussiprojekteja laajempia.

Sähköbussien käyttötapaa palveleva lataaminen on luotettavan operoinnin kannalta kokonaisjärjestelmässä välttämätöntä. Latausteknologiat, rajapinnat ja standardointi ovat kehittyneet voimakkaasti akku- ja ajoneuvoteknologian rinnalla ja tällä hetkellä lataus on käytännössä sähköbussien teknologiaan verrattavalla tasolla. Laaja eurooppalainen ASSURED-projekti on kehittänyt ja pilotoinut pikalatauksen järjestelmiä sekä myös koordinoitunut yhteensopivuuden ja kaluston ristiinoperoitavuuden edistämistä. ASSURED-projekti on julkaissut mm. ristiinoperoitavuusprotokollan [ASSURED 2020]. Tällä hetkellä eurooppalaisissa sähköbussijärjestelmissä käytetään sekä varikkoladattavia busseja että käytönaikaista pikalatausta, jossa hyödynnetään yleisimmin automaattisia pantografirajapintoja, joissa pantografi on asennettu bussin katolle. Pikalatauksen tehotasot ovat tyypillisesti noin 300 kW ja raskaimmassa kalustossa myös tätä enemmän. Sähköbussimäärien kasvaessa vaikutukset sähköverkkoon ja älykäs lataaminen kysyntäjoustopuolelta tulevat aiempaa tärkeämmäksi.

Kylmän vuodenajan käytössä täyssähköbussien lämmönhallinta tuottaa nykyisellään haasteita tavoiteltaessa nollapäästöistä joukkoliikennejärjestelmää. Monissa sähköbusseissa on nykyään dieselkäyttöinen lisälämmitin, joka voi aktivoitua jo 0 °C lämpötilassa. Täyssähköisiä lämmönhallintaratkaisuita ovat käytännössä kaikista sähköbusseista löytyvät ilmalämpöpumput ja osassa käytetyt vesikiertoiset sähkölämmitykset. Valmistajilla voi olla tarjolla vaihtoehtoisia lämmitysratkaisuita. Nollapäästöisessä sähköbussissa lämmönhallinta sähköllä lisää energiankulutusta talvikaudella merkittävästi ja siten lyhentää toimintamatkaa, vaatii suurempaa akkukapasiteettia tai lisää riippuvuutta käytönaikaisesta latauksesta.



### 3.3.2 Vety-polttokennobussit

Vety-polttokennobussit ovat sekä teknologisesti että markkinavalmiuden osalta kehityksessään useita vuosia sähköbusseja jäljessä. Euroopassa on ollut vetybussihankkeita jo vuodesta 2010 alkaen (Kuva 3 ja Taulukko 4) ja satoja busseja on testattu. Euroopassa on ajettu yli 11 miljoonaa kilometriä vetybusseilla elokuuhun 2020 mennessä. Esimerkiksi 3EMotion-projektin uusimmat tulokset (kesäkuulta 2021) ovat yli 3 miljoonaa ajokilometriä ja lähes 4000 t säästettyjä hiilidioksidipäästöjä. Bussien keskekulutus on ollut 9,6 kgH<sub>2</sub>/100 km.



Kuva 3: Operoinnissa olevat vetybussit (vihreä) sekä suunnitteilla olevat vetybussit (oranssi). (Lähde: [fuel-cellbuses.eu](http://fuel-cellbuses.eu)).



*Taulukko 4: Eurooppalaiset vetybussiprojektit. Taulukko koostettu seuraavista lähteistä: Fuel Cell Electric Buses | knowledge base ([fuelcellbuses.eu](http://fuelcellbuses.eu)), Creating a European Market for Fuel Cell Buses: An Introduction to the JIVE Projects -esittely, [Project - CoachHyfied](#), The launch of EU CoachHyfield project: towards the development of a fuel cell coach ([sustainable-bus.com](http://sustainable-bus.com)).*

Projektin nimi	Aika	Bussivalmistajat	Bussimäärä	Mukana olevat maat
CHIC	2010 – 2016	Solaris	kymmeniä	Italia, Sveitsi, Saksa, Norja
High V.Lo.City	2012 – 2018	Solaris ja Van Hool	kymmeniä	Alankomaat, Britannia, Belgia, Ranska
HyTransit	2013 – 2018	Van Hool	kymmeniä	Skotlanti
3Emotion	2015 – 2020	Van Hool	kymmeniä	Tanska, Alankomaat, Britannia, Ranska
NewBusFuel*	2015 – 2017			Norja, Latvia, Britannia, Saksa, Belgia, Italia, Espanja
MEHRLIN*	2017 – 2020			Britannia, Alankomaat, Italia, Saksa
JIVE	2017 – 2022 ->	Solaris, Wrightbus, Caetano	satoja	Saksa, Britannia, Skotlanti, Italia, Alankomaat, Tanska, Belgia
JIVE 2	2018 – 2022 ->	Optare, Wrightbus, Safra, Solaris, Van Hool, Caetano	satoja	Saksa, Ranska, Britannia, Skotlanti, Alankomaat, Espanja
H2Bus Europe	2019 – 2022 ->	Wrightbus	satoja	Tanska, Latvia, Britannia
CoachHyfied	2021 – 2025	Otokar	muutamia	Tanska, UK, Turkki, Itävalta, Saksa, Ranska, Alankomaat, Latvia

\* projekti liittyy vetytankkausasemiin

Euroopassa toimii muutamia vetybussivalmistajia (Taulukko 5), mutta niiden määrä näyttää olevan kasvussa.

*Taulukko 5: Vetysähköbussien eurooppalaisia valmistajia.*

Valmistaja / Malli	Maa	Polttokenno	Kantama	Vetyvarasto	Nettisivut
Alexander Dennis / Enviro400FCEV	Skotlanti	Ballard FCmove-HD	480 km	-	<a href="https://www.alexander-dennis.com/">https://www.alexander-dennis.com/</a>
Caetanobus / H2.City Gold	Portugali	60kW Toyota FC Stack	400 km	37,5 kg	<a href="https://caetanobus.pt/en/">https://caetanobus.pt/en/</a>
EvoBus	Saksa				<a href="https://www.evo-bus.com/de-en/">https://www.evo-bus.com/de-en/</a>
Rampini / H80	Italia	N/A	N/A	N/A	<a href="https://www.rampini.it/en/">https://www.rampini.it/en/</a>
Solaris Bus & Coach / Urbino 12 hydrogen	Puola	70 kW	350 km	n. 35 kg	<a href="https://www.solaris-bus.com/">https://www.solaris-bus.com/</a>
VanHool / A330 Fuel Cell	Belgia	Ballard	N/A	N/A	<a href="https://www.van-hool.be/en/">https://www.van-hool.be/en/</a>
Wright Bus / GB KITE DF FCEV	Irlanti	Ballard FCmove 70 kW / 100 kW	724 km / 1030 km	35 kg / 50 kg	<a href="https://wrightbus.com/">https://wrightbus.com/</a>
Safra / Businova 12-H2	Ranska	30 kW Symbio	350 km	30 kg	<a href="https://safra.fr/en/home/">https://safra.fr/en/home/</a>

Vetytankkausaseman vedyn tuotanto voi olla joko "on-site" tai "off-site"-tyyppinen riippuen siitä, tuotetaanko tankattava vety paikan päällä esimerkiksi elektrolyysillä vai tuodaanko se kuljettaen muualta. Selvästi suurin osa maailman vetytankkausasemista ovat "off-site"-tyyppiä. Yksi suurimpia rajoitteita vetytankkausasemien yleistyvyydessä on niiden korkea investointikustannus, joka on noin 1–5 miljoonaa



euroa tankkausasemaa kohden riippuen vedyn säilöntätavasta [Bradley et al., 2019]. Kompressoitu vetytankkausasema on nesteytettyyn vetytankkausasemaan verrattuna edullisempi, mutta sen säilöntäkapasiteetti on pienempi, mikä puolestaan lisää vetysäiliön (vetytrailerin tai vetykontin) vaihtotarvetta. ”On-site”-tankkausaseman investointikustannus on suurin, koska tankkauslaitteiston lisäksi on investoitava vedyn tuotannon laitteistoon.

Suomessa teollisuus tuottaa noin 18–22 tuhatta tonnia vetyä prosessien sivuvirtana, jota tällä hetkellä hyödynnetään pääosin matalan arvon käyttökohteisiin kuten polttoaineena lämmöntuotannossa. Vetyä sivutuotteena tuottavia toimijoita Suomessa ovat tällä hetkellä Kemira Chemicals sekä Nouryon Finland. Tällä tuotetulla vedyllä on puhdistettuna merkittävä potentiaali liikennekäytössä. [Aronsson et al., 2020]. Suomessa vetyä on todennäköisesti saatavilla enenevässä määrin tulevaisuudessa; esimerkiksi P2X Solutions teki helmikuussa 2022 70 miljoonan euron investointipäätöksen 20 MW:n elektrolyyseristä Harjavaltaan, jonka on tarkoitus aloittaa toimintansa vuonna 2024 [Yle Uutiset, 2022a]. Lahti Energia ja Nordic Ren-Gas Oy suunnittelevat Lahteen noin 250 miljoonan euron vihreän vedyn tuotantolaitosta, jonka elektrolyyseriteho olisi 20 MW:n laitoksen valmistumisvuonna 2025, ja joka laajentuisi 120 MW:iin vuoteen 2030 mennessä [Yle Uutiset, 2022b].



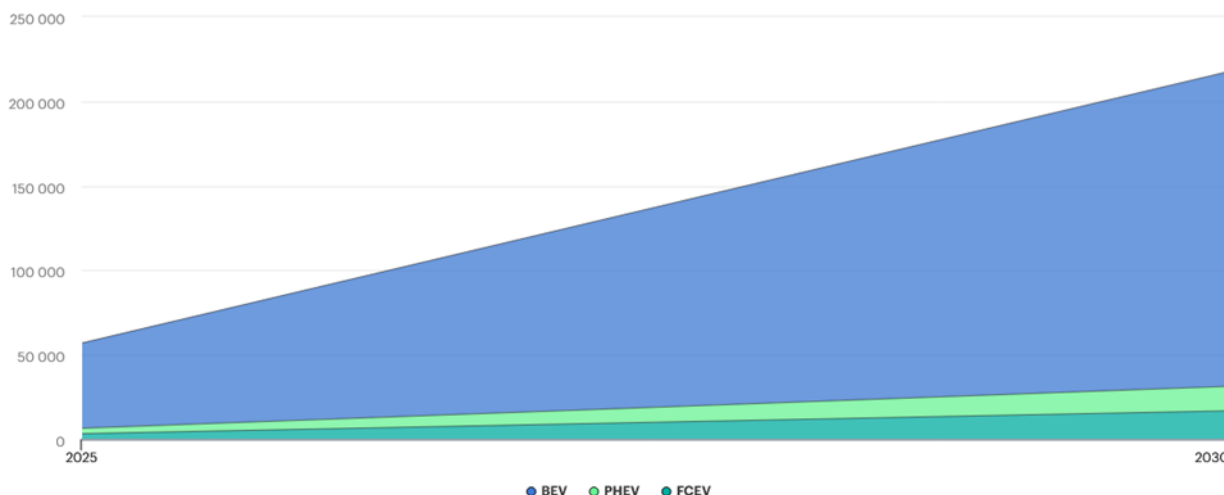
### 3.4 Sähkö- ja vetypolttokennobussien kehitysnäkymät ja riskit

Tulevalla vuosikymmenellä nollapäästöisen joukkoliikenteen odotetaan edelleen etenevän laajamittaiseen toteutukseen. IEA:n analyysin ja ennusteen perusteella suurimman osan vaihtoehtoisten käyttövoimien markkinasta tulevat ottamaan sähköbussit [IEA 2021]. Ladattavia hybridejä ja polttokennobusseja ennustetaan olevan karkeasti yhtä paljon ja nollapäästöisten ajoneuvojen markkinaosuus tulee kasvaan.

Teknologiaan, sen saatavuuteen ja markkinan kehittymiseen liittyy riskejä sekä sähkö- että polttokennobusseilla. Polttokennobusseilla nämä ovat kuitenkin selkeästi sähköbusseja korkeampia, johtuen polttokennoratkaisun alemmasta teknologisesta ja markkinavalmiudesta.

Sähköbussien osalta teknologiaratkaisuiden voidaan odottaa edelleen kehittyvän useita vuosia: akkujen energiatiheys paranee, pikaladattavuus paranee, elinikä kasvaa ja akkujärjestelmien hinta laskee, vaikakaan kaikki edellä mainitut ominaisuudet eivät välttämättä parane samaa vauhtia tai samaan aikaan yhdessä tuotteessa. Yksi selkeä trendi erityisesti kiinalaisvalmisteisissa sähköbussissa on akkukapasiteetin voimakas kasvattaminen ja varikkolatauksen hyödyntäminen. Latausteknologioiden ja ratkaisuiden kehitys jatkuu kohti luotettavampia, käyttäjäystävällisempiä ja monikäyttöisempiä latausjärjestelmiä. Sähköbussien käytön rajana operaattorien näkökulmasta on edelleen kustannustehokas ja luotettava latauksen järjestäminen varikolla tai operoinnin aikana, sekä akkukapasiteetin asettamat rajoitukset ajomatkalle. Talviolosuhteet ja lämmityksen järjestäminen nollapäästöisesti lisäävät kulutusta ja siten lyhentävät ajomatkaa ja operoitavuutta.

Sähköbussien markkinariskeihin voidaan laskea hankintahintojen ennakoitua hitaampi aleneminen, jos esimerkiksi akkutuotannon skaalauksessa tai materiaalien toimitusketjuissa tulee haasteita.



Kuva 4: IEA GEVO2021 kestävä kasvun skenaario (Sustainable Development Scenario).

Akkukäyttöisten ajoneuvojen suurin turvallisuuteen liittyvä riski on suurienergisen litiumioniakuston tulipalovaara, joka on erityisen suuri ajoneuvokäyttökohteissa, koska sekä teho- että latausnopeusvaatimukset ovat suuria. Akkukäyttöisen ajoneuvon tulipalon sammuttaminen voi osoittautua ongelmalliseksi litiumioniakun uudelleensyttymisen takia. Koska akkukäyttöiset ajoneuvot ovat verrattain uusi ilmentymä maantieliikenteessä, ei niiden onnettomuuksien syistä ole vielä olemassa selkeää dataa. [Bisschop et al., 2020]. VTT:n HSL:lle aiemmassa tehdyssä selvityksessä sähköajoneuvojen latauksen riskeistä [Haavisto et al., 2020] tultiin johtopäätökseen, ettei sähköautojen tai -bussien lataaminen lisää paloriskiä verrattuna niiden muuhun normaaliin käyttöön, kunhan käytetään asianmukaisia latureita ja noudatetaan sähköajoneuvojen ja laturien valmistajien määrittämiä ohjeistuksia.



Polttokennoajoneuvoissa suurin turvallisuusriski on vetykaasu, joka on erittäin voimakkaasti reagoiva kaasu hapen kanssa. Vetymolekyylin pienikokoisuus sekä vetykaasun paineistus 350–700 bar edesauttaa vedyn ei-haluttua vuotamista etenkin järjestelmän liitoskohdista. Vetykaasulle on myös tyypillistä, monien muiden kaasujen vastaisesti, että se kuumenee vuotaessaan korkeapaineisesta lähteestä [Crowl ja Jo, 2007]. Nämä ominaisuudet yhdessä lisäävät onnettomuuden vaaraa vetykäyttöisissä järjestelmissä.

Vety on kaasuna hajuton ja väritön, mikä hankaloittaa vuotojen havaitsemista ihmisaistein. Se ei kuitenkaan ole ihmiselle myrkyllinen, mutta voi aiheuttaa hapenpuuttilan syrjäyttämällä hapen ilmatilassa. Suurin vaaraa aiheuttava tekijä on kuitenkin vedyn ei-haluttu syttyminen vetyvuodosta joko ajoneuvon tankkauksessa tai itse ajoneuvossa. Onnettomuuden riskiä voidaan pienentää huomattavasti vetykaasun havaitsojilla niin vetytankkausasemilla kuin ajoneuvoissakin [Fuel cell electric buses].

Vetypolttokennoisissa busseissa on vielä teknologiaan liittyviä haasteita ja riskejä. Yksi suuri haaste on vihreän vedyn valmistuskapasiteetin riittävyys polttoaineeksi sekä sen hinta suhteessa fossiilipohjaiseen vetyyn, joka edustaa nykyään vieläkin yli 90 % kaikesta tuotetusta vedystä maailmassa. EU-regulaatio on kuitenkin ohjaamassa vihreän vedyn tuotantoa siihen suuntaan, että tämän ei pitäisi olla ongelma jatkossa. Fossiilipohjaista vetyä käyttämällä bussit eivät ole enää CO<sub>2</sub>-päästöttömiä, vaikka paikallisia CO<sub>2</sub>-päästöjä ei tällöin synnykään. Sama pätee tosin täyssähköbusseihin, joiden CO<sub>2</sub>-päästöttömyys on suoraan sidonnainen ladatun sähkön tuottamiseen alkuperään. Elinkaaritarkastelussa myös ajoneuvon valmistuksen päästöt esimerkiksi akuston valmistuksesta otetaan huomioon käyttöjakson lisäksi.

Koska bussien vetypolttokennotekniikka, vetyinfrastruktuuri sekä vihreän vedyn tuotanto kärsivät vielä epävarmuuksista, on bussioperaattoreilla merkittävä teknologinen riski niiden käyttöönotossa suuremmassa mittakaavassa. Bussioperaattorien onkin syytä ottaa tämä riski huomioon varmistamalla, että kaikki vetypolttokennobussien toimintaan liittyvät toimijat ovat mukana käyttöönotosuunnitelmissa jo varhaisessa vaiheessa. [Element Energy, 2017]. Teknologinen riski voi toisaalta olla jopa suurempikin pienemmässä mittakaavassa, mikäli esimerkiksi koko vetybussikalusto turvautuu yhteen vetytankkausasemaan. Tällöin tankkausaseman vikaantuessa koko kalusto on ilman polttoainetta.

Huomioitavaa on, että vetypolttokennojen pääasialliseksi käyttökohteeksi kaavaillaan nyt raskasta rahti-liikennettä. Vedyn hankintakustannuksen kannalta on ensiarvoisen tärkeää etsiä mahdollisuuksia yhteisen tankkausinfraan käytölle bussien ja muun raskaan vetyliikenteen kanssa. Muun raskaan vetyliikenteen kaupallistuminen vaikuttaa voimakkaasti vedyn hankintahinnan lisäksi myös busseissa käytettyjen polttokennojen hintatasoon.



## 3.5 Uusien käyttövoimien soveltuvuusarviot

Linja-autojen eri käyttövoimien teknis-taloudellista houkuttelevuutta ja kilpailukykyä on arvioitu ajoneuvon omistajan kokonaiskustannuksen (Total Cost of Ownership, TCO) ennakoitujen kehityksen kautta. Tarkastelu painottuu sähkön ja vedyn vertailuun, sekä näiden yhteisenä vertailupisteinä käytettyyn sekoitevelvoitteen mukaista HVO-osuutta käyttävään dieselbussiin.

On syytä korostaa, että omistajan kokonaiskustannuksen analysoinnissa käytetyillä lähtötiedoilla ja oletuksilla on keskeinen vaikutus tuloksiin, erityisesti arvioitaessa tulevaa kehitystä kymmenen vuoden jaksolla. Epävarmuuksia on sekä pääomakustannusten eli hankintahintojen ja teknologian kehittymisen ja elinkaaren osalta, että käyttökustannuksissa käyttövoiman hinnan ja suhteellisen hintakehityksen suhteen.

### 3.5.1 Menetelmä ja lähtötiedot

Vertailukohtaksi dieselille valittiin sekoitevelvoitteen mukainen HVO-osuus, koska valtakunnan tasolla tätä korkeampaa ilmastovaikutusta ei HVO:n käytöllä saavuteta. Pohjana on käytetty aiemmin KAROLIINA-hankkeessa kehitettyä laskentapohjaa, jota on edelleen kehitetty tämän analyysin tarpeisiin. TCO-laskenta sisältää sekä pääomakulut (CAPEX) että ajoneuvojen käyttöön liittyvät muuttuvat kulut (OPEX). Kaluston käyttöön kuluva työtunteja ei ole huomioitu, eli analyysi olettaa, että tältä osin käyttövoimien välillä ei ole eroa. Analyysi ei myöskään ota suoraan kantaa eri lataus- ja tankkausinfrastruktuurin olemassaoloon tai toteuttavuuteen ajoneuvojen operoinnin mahdollistamiseksi. TCO-analyysin metodiikkaa on esitelty aiemmin [Pihlatie et al., 2021] [Pihlatie et al., 2014] ja siinä ei huomioida kuljettajan työn osuutta. Analyysin tausta- ja lähtötietoja on koottu muun muassa seuraavista lähteistä: [Frost & Sullivan, 2021], [Ruf et al., 2020], [Phadke et al., 2021]. Polttoaineiden hinnoista tehtyjä oletuksia on peilattu lähteisiin [Sipilä et al., 2018], [NEOT Oy, 2021].

Analyysissä tarkastellut päämuuttujat ja käytetyt arvot on esitetty taulukossa alla (Taulukko 6). Ajoneuvojen pitoajaksi (poistoajaksi) oletetaan 15 vuotta tasaisella poisto-ohjelmalla. Analyysi ei ota kantaa siihen, vaihtaako ajoneuvo omistajaa käyttönsä aikana ja millä jäännösarvoilla. Ajovoimalinjan ja latausinfrastruktuurin eliniäksi oletetaan ajoneuvon pitoaika 15 vuotta, polttokennojen 30000 käyttötuntia. Akkujen elinikä on laskennassa muuttujana yksinkertaistetusti siten, että akun kapasiteetin, käyttötapauksen ominaiskulutuksen ja ajokilometrien (käyttösykliä) mukaisesti arvioidaan akun elinikä oletetun sykliliiniän pohjalta. Akun poistuessa ajoneuvokäytöstä on mahdollista ja jopa todennäköistä, että akulle kirjataan jäännösarvo ajatellen mahdollinen jatkokäyttö ns. second life -sovelluskohteessa. Tämä jäännösarvo ei tämän hetken markkinassa ole hyvin määritelty ja siksi tässä analyysissä akun jäännösarvoksi oletetaan 0%.

Taulukko 6: TCO-analyysin lähtötietoja.

Suure	Arvo
Korkokanta	5%
Ajoneuvon pitoaika	15 v (ei käyttöasteriippuvuutta)
Latauslaitteen pitoaika	15 v (ei käyttöasteriippuvuutta)
Polttokennon elinikä	30000 käyttötuntia
Liikennöintipäiviä vuodessa	300

Kullekin aiemmin esitellylle (Taulukko 3) kolmelle käyttötapaukselle ja siinä käytetylle edustavalle ajoneuvolle tehtiin kaksi TCO-laskelmaa. Ensimmäinen on paras arvio tämän hetken omistajan kokonaiskustannuksesta ja sen rakenteesta esitetyillä kyseisen linjatyyppin/käyttötapauksen tyypillisellä vuotuisella kilometrisuoritteella. Toiseksi, skenaarioiden kautta pyritään arvioimaan tulevaa kehitystä seuraavan vuosikymmenen aikana kolmea eri hankintapäätöksen hetkeä kuvaavalla käyrällä (vuodet 2021, 2025 ja



2030). Skenaarioissa esitystapa on TCO ajettua kilometriä kohden vuotuisen kilometrisuoritteen funktiona. Keskeisimpien TCO-skenaarioiden 15 vuoden tarkasteluvälillä muuttuvien lähtöparametrien arvot on esitetty liitteessä taulukoissa Taulukko 7 ja Taulukko 8. Analyysille keskeisen energiankulutuksen osalta lähtötietoina on käytetty VTT:n bussitietokantaa sekä erityisesti omia simulaatioita hyödyntäen VTT Smart eFleet simulointiympäristön ajoneuvo- ja ajosyklikuvauksia ja hyödyntäen kappaleessa 3.3.2 mainittua käyttökokemustietoa vetybussien kulutuksesta.

Analysoiduissa sähköbussissa ei ole dieselkäyttöistä lisälämmitintä vaan ne ovat nollapäästöisiä. Perustapauksessa sähköbussien energiankulutus oletettiin 10% suuremmaksi kuin vastaavan vetybussin sähköenergian kulutus. Mainitun 10% oletetaan kuluvan sähköbussin lämmitykseen, kun vetypolttonobussilla lämpö saadaan polttokennon sivutuotteena. Todellisuudessa täyssähköbussin energiankulutus talvikäytössä nousee vielä tätä suuremmaksi, mikä johtaa talvikaudella tarpeeseen kasvattaa ajoakun kapasiteettia ja tukeutua kasvavasti käytönaikaiseen lataukseen. Herkkyystarkastelussa tarkasteltiin sähköbussille variaatiota, jossa energiankulutus kilometriä kohti nousi 20% perustapauksesta.

Sähkö- ja vetybusseille ei ole oletettu mitään hankintatukia. Vaihtoehtoisten käyttövoimien infrastruktuurin järjestämiseen saattaa mahdollisesti kanavoitua myös bussiliikenteen uusien käyttövoimien käyttöönottoa tukevia mekanismeja kuten infratuki. Näitä ei ole analyysissä huomioitu.

Ajoneuvojen käyttökustannuksiin vaikuttaa paljon polttoaineen hinta. Sekä dieselin että sähkön hinnoissa on vuoden 2021 syksyllä nähty voimakasta vaihtelua pörssisähkön ja raakaöljyn hinnan nousun kautta ja siten polttoaineiden hinta oletuksissa on selkeästi epävarmuutta. Tarkastelujen tärkeimmät lähtötiedot on koottu alla oleviin taulukoihin.

Analyysissä kullekin käyttötapaukselle / bussityypille oletettiin tietty vaatimus keskeytyksettömän ajon matkalle (Taulukko 7) siten, että kyseinen suorite saavutetaan 80% akkukapasiteetista. Lisäksi käytönaikaisen latausinfrastruktuurin toteutettavuutta arvioitiin kolmeportaisella asteikolla: 1 = helppo, 2 = keski- vaikea, 3 = vaikea; näitä vastaavat ajovoima-akun kokoon vaikuttavat jakajat olivat: 1 = 1.0, 2 = 0.9, 3 = 0.7. Siten esimerkiksi käyttötapauksessa, jossa latausinfra toteuttaminen arvioidaan vaikeaksi, johtaa tämä ajoakun mitoituksen kasvattamiseen 43%. Kaikki analysoidut joukkoliikenteen tapaukset luokiteltiin luokkaan 1.

Akuston eliniälle on käytetty aiemmin [Pihlatie et al., 2014] kuvattua menetelmää, jossa elinikä on yhteydessä akuston käyttötapaan ja lataus-purkusykliin määrään siten, että pienemmällä varausalueella tehdyt syklit eivät ikäännytä akkua yhtä paljon kuin täydet syklit. Akuston syklielinikä on oletettu alussa 2500 täyteen sykliin ja pitenevän 2% vuosittain. Analyysissä saadut akustojen eliniät vaihtelivat voimakkaasti keskimääräisen vuotuisen suoritteen mukaan, noin välillä 4 - 15 vuotta. Akuille ei laskettu jäännösarvoa. Polttokennojen eliniäksi oletettiin 30 000 tuntia ja paranevan 2% vuosittain.



Taulukko 7: TCO-skenaarioanalyysin tärkeimmät lähtötiedot ja parametrit. Kulutuslukemat on arvioitu puolella kuormalla.

Käyttötapaukset	Syöttölinja	Seutulinja	Runkolinja
Ajoneuvotyyppi	A	C	D
Ajosyklin tyyppi	Urban	Urban	Urban
Varikkoladattavan akun mitoituksen suunnitteluperusteena oleva keskeytyksetön ajomatka (km)	225	300	420
Akuston koko, varikkoladattava (kWh)	363	572	916
Akuston koko, pikaladattava (kWh)*	182	286	458
Akuston koko, polttokenno (kWh) ei ladattava; ladattava**	182; 61	286; 95	458; 153
Polttokennoteho (kW)	100	120	120
Pikalaturin (1,5 C) teho (kW)	272	429	687
Varikkolaturin (0,25 C) teho (kW) varikkoladattava; pikaladattava	91; 45	143; 71	229; 114
Pikaladattavan sähköbussin kulutus puolikuormalla (kWh/km)***	1,53	1,81	2,07 (C +10%)
Vetybussin kulutus puolikuormalla (kgH <sub>2</sub> /100 km)****	9,1	10,8	12,3
Ladattavan vetybussin kulutus puolikuormalla (kgH <sub>2</sub> /100 km; kWh/km)	4,7; 0,6	5,2; 0,7	3,6; 1,1
Dieselbussin kulutus puolikuormalla (l/100 km)	41,9	46,1 (A + 10%)	50,7 (C + 10%)
Huolto ja ylläpito sähkö (€/km)	0,10 (opp.) 0,08 (depot)	0,10 (opp.) 0,08 (depot)	0,20 (opp.) 0,15 (depot)
Huolto ja ylläpito vety (€/km)	0,11	0,11	0,22
Huolto ja ylläpito diesel (€/km)	0,15	0,15	0,19

\* Automaattisen rajapinnan pikalatausvalmiudella varustetuille busseille käytettiin 50% pienempää akkukapasiteettia.

\*\* Ladattaville polttokennobusseille oletettiin akuston kooksi 50% varikkoladattavan sähköbussin akustosta. Ei-ladattavalle polttokennobussille oletettiin akuston kooksi 1/6 varikkoladattavan sähköbussin akustosta.

\*\*\* Varikkoladattavalle sähköbussille oletettiin painavamman akun vuoksi 2% korkeampi kulutus.

\*\*\*\* Vetybussin sähkönkulutus oletettu 10% pienemmäksi kuin sähköbussin kulutus. Vedyn kulutus laskeutu olettaen polttokennon konversiohyötysuhteeksi 45%.



Eri bussityyppien voimalinjakomponenttien oletettuja hintoja ja niiden kehitystä on esitetty alla taulukossa (Taulukko 8). Bussien koreille oletetut hinnat kaikilla käyttövoimilla olivat: 223413 € (A), 268095 € (C) ja 321714 € (D). [Ruf et al., 2020]

Taulukko 8: TCO-skenaarioanalyysissä käytetyt eri voimalinjojen hinnat, euroa (CAPEX).

Vuosi	D			A ja C		
	diesel	sähkö	H2 säiliö 350 bar	diesel	sähkö	H2 säiliö 350 bar
1	18475	46870	27383	16588	43667	16068
2	18475	42694	26366	16588	39708	15481
3	18988	38517	25350	17044	35750	14895
4	19500	34341	24333	17500	31791	14308
5	20013	30165	23317	17956	27833	13722
6	20525	25989	22300	18413	23874	13135
7	21038	21812	21284	18869	19916	12549
8	21550	17636	20267	19325	15957	11962
9	21550	15314	19469	19325	13790	11482
10	21550	12991	18672	19325	11622	11003
11	21550	10669	17874	19325	9455	10523
12	21550	10669	17874	19325	9455	10523
13	21550	10669	17874	19325	9455	10523
14	21550	10669	17874	19325	9455	10523
15	21550	10669	17874	19325	9455	10523

TCO-analyysin skenaario-osuudessa käytetyt eri käyttövoimien hinnat sekä akkujen, polttokennojen ja latauslaitteiden yksikköhinnat on esitetty alla olevassa taulukossa (Taulukko 9). HVO vuotuinen hinnannuutos on oletettu olevan 3%, fossiilisen dieselin 1%, sähköön 2%, vihreän vedyn -4%. Akun elinikä on ilmoitettu täysissä purku-lataussykleissä ja paranevan 2%/vuosi. Polttokennon elinikä taas on ilmoitettu käyttötunteina oletetussa keskimääräisessä toimintapisteessä ja paranevan 2%/vuosi. On huomattava, että käyttövoimien (fossiilinen diesel, HVO, sähkö ja vety) esitetty hinta taulukossa on muodostettu olettaen kunakin 15 hankintavuotena nykyarvoon diskontattu polttoaineen hinta huomioiden edellä mainitut muutosnopeudet. Ensimmäisen vuoden lähtöarvot olivat: diesel 1,50 €/l, HVO 1,64 €/l, sähkö 0,15 €/kWh, vety 10 €/kg. Akun ja polttokennon hintamuutokset arvioitu lähteestä [Ruf et al., 2020]. Yhdelle vetytankkauspisteelle oletettiin hinta 600 k€ ja sen oletettiin pystyvän palvelemaan samaan aikaan bussivarikolle sijoitettuna 20 bussia. Yhtä bussia kohden vetytankkauksen investointi oli siten 30 k€. Sähköbusseille yhden pikalaturin oletettiin pystyvän palvelemaan 10 bussia, varikkolatureihin investoitiin 1 laturi bussia kohti.



Taulukko 9: TCO-skenaarioanalyysin eri käyttövoimien hinnat, polttokennojen, laturien ja akkujen hinnat, sekä akun ja polttokennojen elinikä.

Vuosi	Akusto €/kWh	Lataus- laite €/kW	Poltto- kenno €/kW	Sekoite- velvoite	Diesel €/l	HVO €/l	Sähkö €/kWh	H2 €/kg	Akun syklielinikä	Polttokennon elinikä
1	360	600	500	0.2	1.61	2.03	0.17	7.63	2500	30000
2	307	597	477	0.21	1.62	2.09	0.18	7.32	2550	30600
3	254	594	453	0.22	1.64	2.15	0.18	7.03	2601	31212
4	200	591	430	0.23	1.66	2.22	0.18	6.75	2653	31836
5	199	588	407	0.24	1.67	2.28	0.19	6.48	2706	32473
6	197	585	384	0.25	1.69	2.35	0.19	6.22	2760	33122
7	195	582	360	0.26	1.71	2.42	0.19	5.97	2815	33785
8	193	579	337	0.27	1.72	2.50	0.20	5.73	2872	34461
9	192	576	318	0.28	1.74	2.57	0.20	5.50	2929	35150
10	190	574	299	0.29	1.76	2.65	0.21	5.28	2988	35853
11	188	571	280	0.3	1.78	2.73	0.21	5.07	3047	36570
12	188	568	280	0.31	1.79	2.81	0.21	4.87	3108	37301
13	188	565	280	0.32	1.81	2.89	0.22	4.67	3171	38047
14	188	562	280	0.33	1.83	2.98	0.22	4.49	3234	38808
15	188	559	280	0.34	1.85	3.07	0.23	4.31	3299	39584

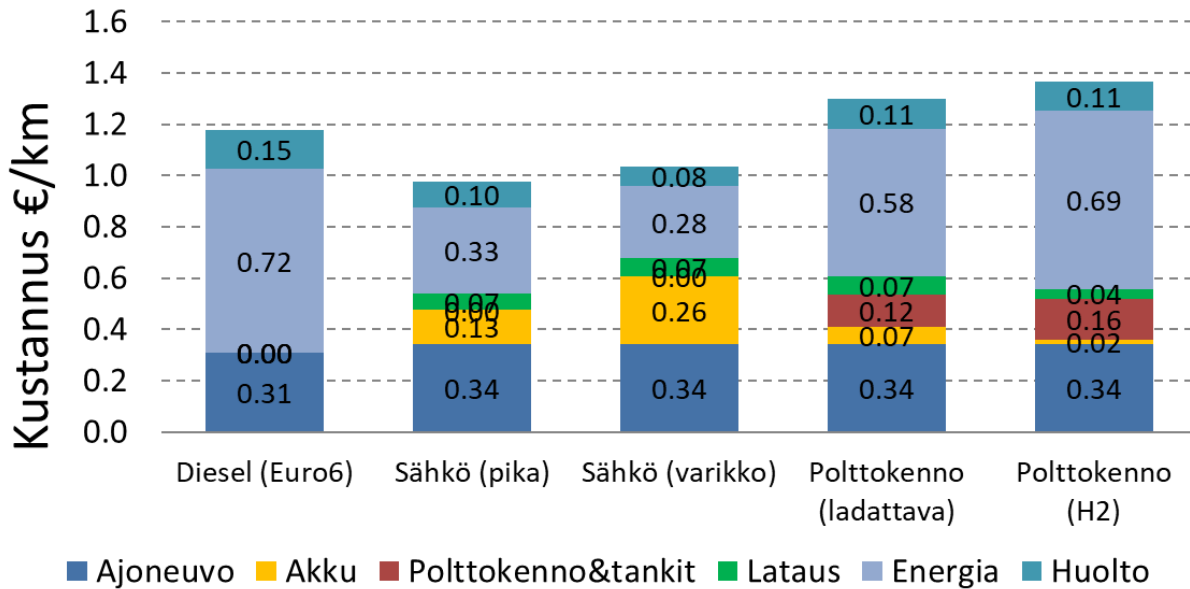
### 3.5.2 Tulokset

Seuraavassa on esitetty TCO-analyysin tulokset kullekin kolmelle käyttötapauskelle edellä esitetyillä oletuksilla ja lähtötiedoilla. On syytä korostaa, että käytettyjen lähtöarvojen ja oletusten vaikutus lopputulokseen on huomattava. Lisäksi esimerkiksi pikaladattavan ja varikkoladattavan sähköbussin hintaero näytetään tuloksissa pienenä, jolloin näiden välillä valinnan saattaa ratkaista liikennöitsijän infrastruktuurivaihto, pikaladattavan saatavuus liikenteen tilaajan toimesta, sekä esimerkiksi bussivarikon sijoittuminen suhteessa liikennöitäviin linjoihin. Sähkön ja vedyn yhdistävän ajoneuvokonseptin ladattava sähköbussi toimintamatkaa jatkavalla polttokennolla (FC-REV with charging) toteutusta ja mitoitusta ei ole optimoitu.

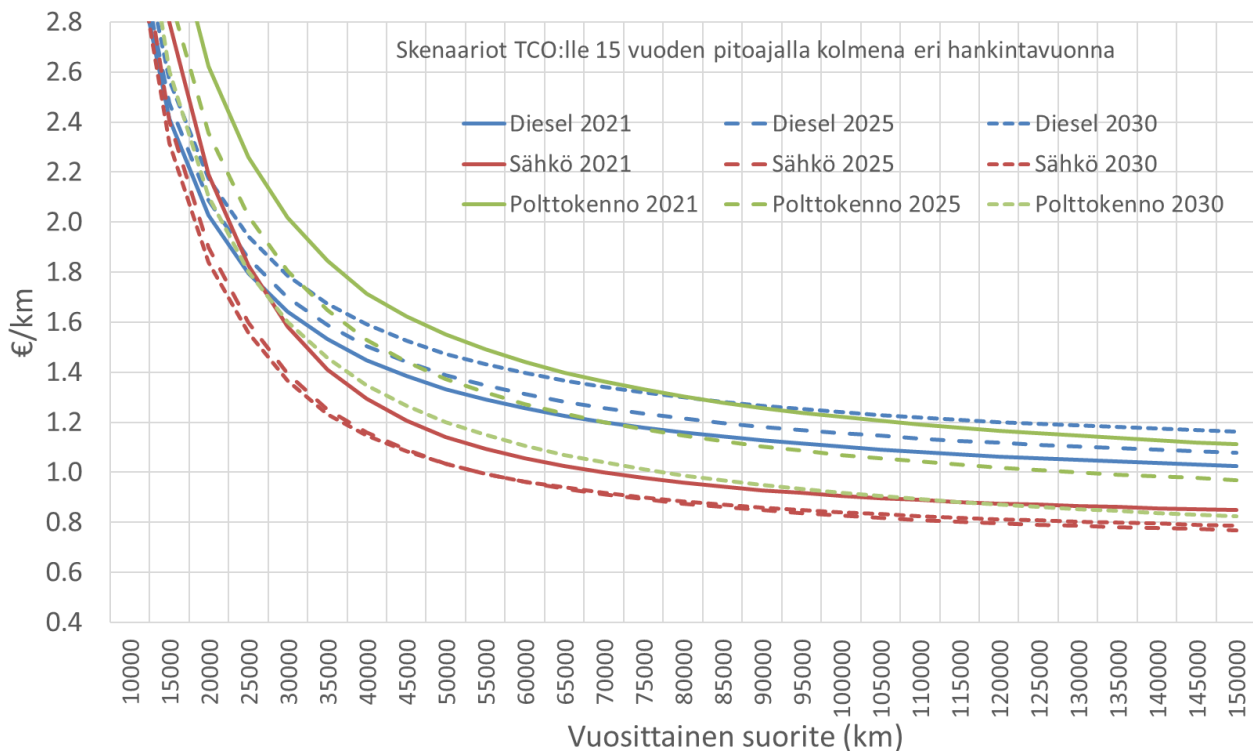
Eri muuttujien vaikutusta tulokseen on tarkasteltu herkkyyštarkastelussa tämän osion lopussa.



## 3.5.2.1 Syöttölinja



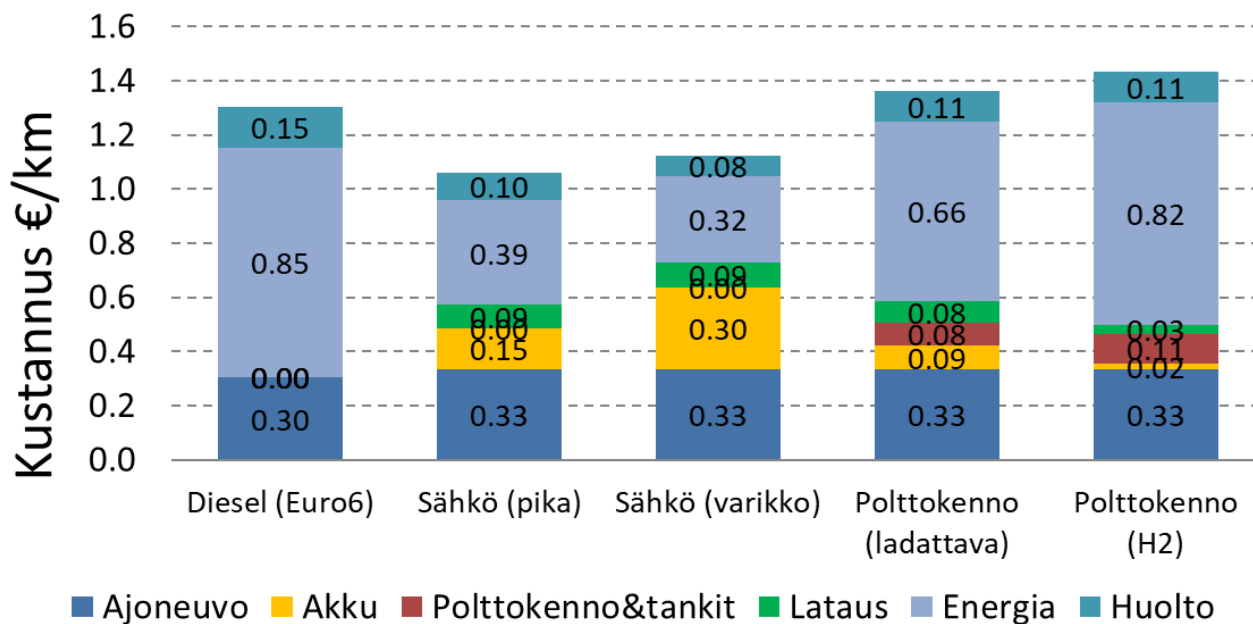
Kuva 5: TCO syöttöliikenteen A-luokan busseille 75 000 km vuosisuoritteella



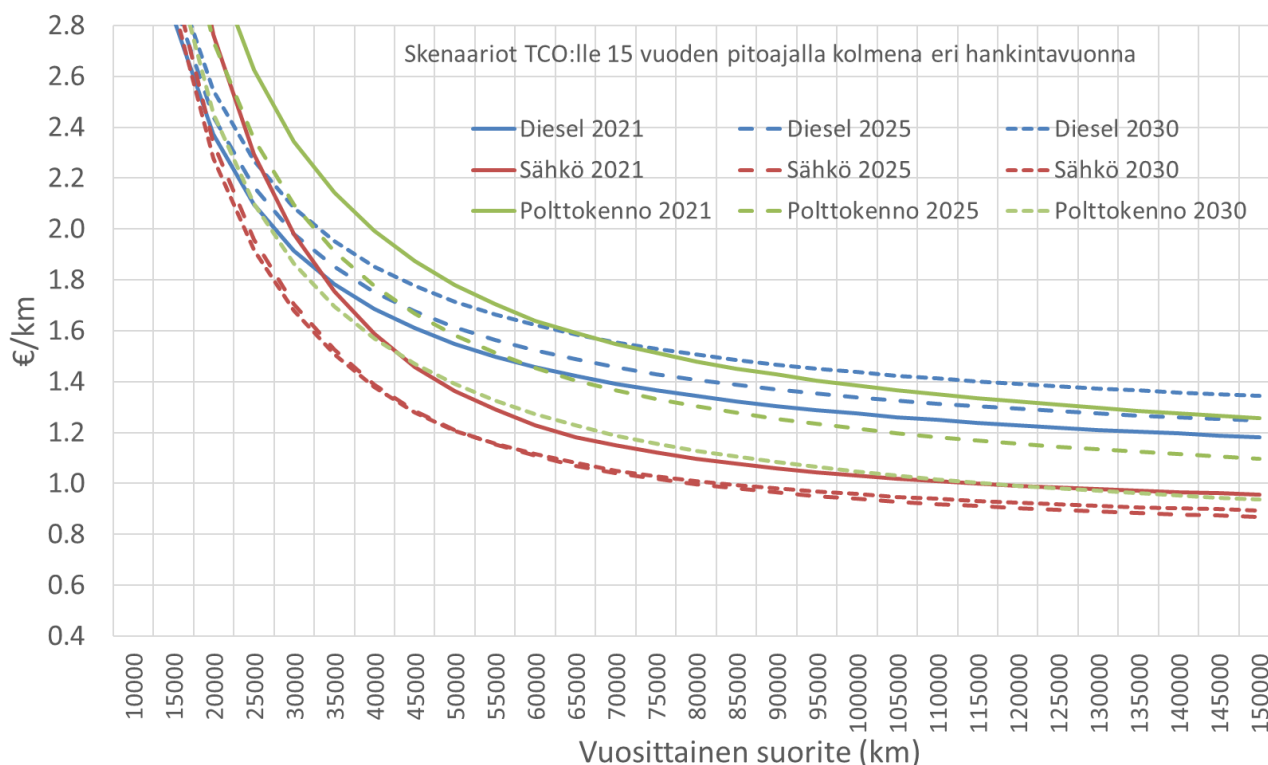
Kuva 6: Skenaario TCO:n kehittymisestä syöttöliikenteen A-kalustolle 15 vuoden pitoajalla kun hankinta on tehty 2021, 2025 tai 2030, vuotuisen ajosuoritteen mukaan



## 3.5.2.2 Seutulinja

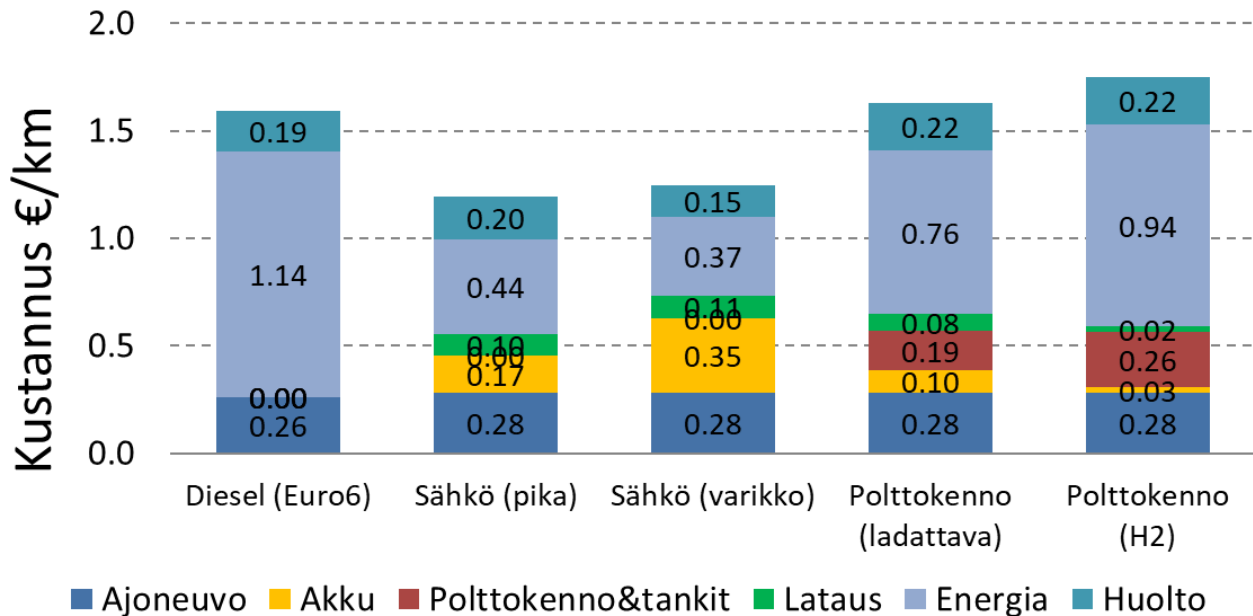


Kuva 7: TCO seutuliiikenteen C-luokan busseille 90 000 km vuosisuoritteella

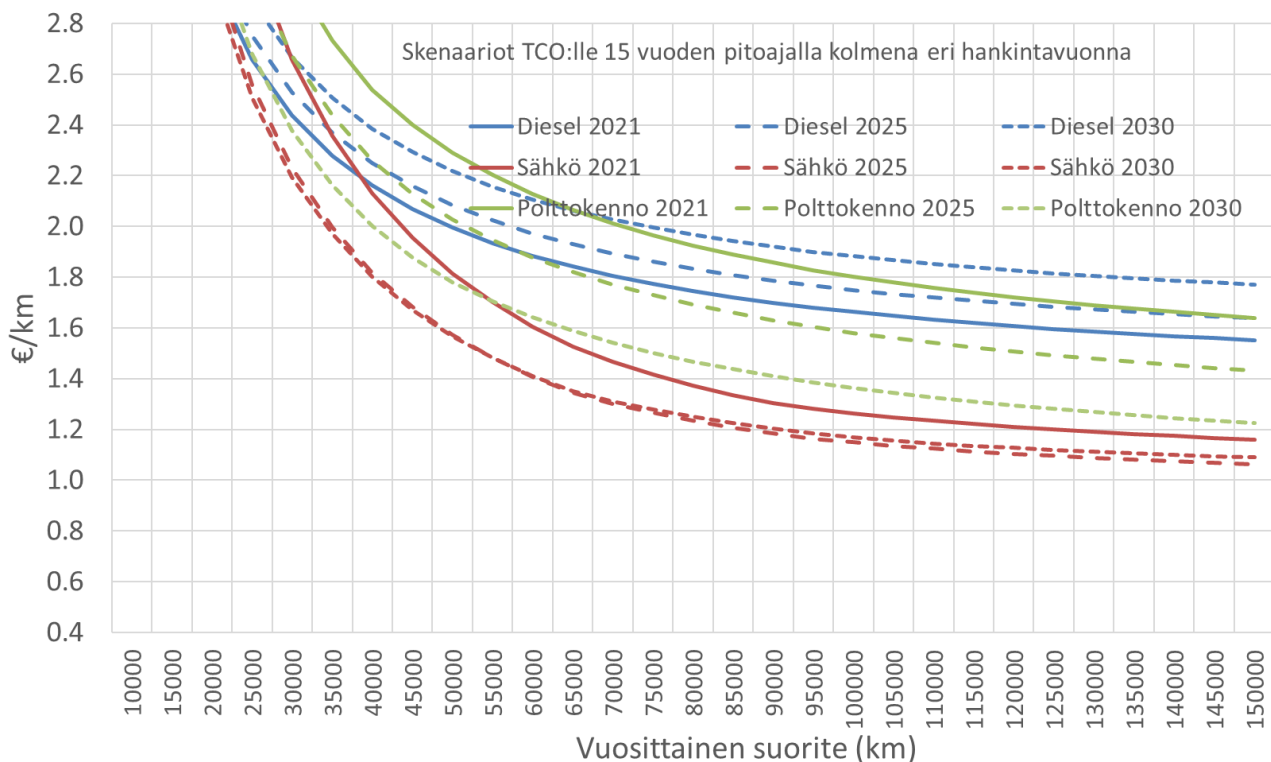


Kuva 8: Skenaario TCO:n kehittämisestä syöttöliikenteen C-kalustolle 15 vuoden pitoajalla kun hankinta on tehty 2021, 2025 tai 2030, vuotuisen ajosuoritteen mukaan

## 3.5.2.3 Runkolinja



Kuva 9: TCO runkolinjaliikenteen D-luokan busseille 126 000 km vuosisuoritteella



Kuva 10: Skenaario TCO:n kehitymisestä syöttöliikenteen D-kalustolle 15 vuoden pitoajalla kun hankinta on tehty 2021, 2025 tai 2030, vuotuisen ajosuoritteen mukaan



### 3.5.2.4 Herkkyystarkastelu

Analyysin muutamien avainmuuttujien herkkyksiä skenaarioesityksessä on tarkasteltu lyhyesti seuraavassa. Keskeisimpinä tuloksiin vaikuttavina muuttujia ovat muun muassa: akkujen hinta ja elinikä, poltto-  
kennojen elinikä, infrastruktuurin kustannus, vihreän vedyn hinta, sähkön hinta ja dieselin vertailuhinta. Useat näistä muuttujista ovat keskenään riippumattomia ja ne toteutuvat siten erilaisina satunnaisina yhdistelminä. Alla esitetty kuvaaja edustaa karkeaa arviota vaihteluvälistä (minimi - maksimi) jolla muuttamien valittujen muuttujien eri yhdistelmillä voidaan päätyä vuonna 2025, ottamatta kantaa yksittäisten muuttujien riippuvuuksiin, epävarmuuksiin ja jakaumiin tarkemmin. Joillekin muuttujille kuten sähkön hinnalle voidaan ennakoida kasvavaa volatiliteettiä ja vaihtelua esimerkiksi spot-sähkön hinnassa - esimerkiksi älykäs lataaminen varikolla halvan sähkön aikaan voi mahdollistaa säästöjä tai tuoda hintapiikkien aikaan lisäkustannuksia. On syytä huomata, että sähkön markkinahinta ja vedyn hinta eivät todennäköisesti ole toisistaan riippumattomia, koska vihreä vety tuotetaan päästöttömästi sähköstä elektrolyysillä erityisesti halvemman markkinasähkön aikaan. Toisin sanoen vihreän vedyn tuotanto lisää sähkön kysyntää luultavasti erityisesti sähkön ylituotannon aikaan eli voi tasoittaa sähkön markkinahinnan vaihte-  
luita samalla kysyntäjoustoreservin kokoa kasvattaen. Tässä työssä ei ole analysoitu sähkömarkkinan kehittymistä laajempaa vedyn tuotantoa ajatellen. Lisäksi vedyn osalta, laskelma lähtee oletuksesta, että liikennelaatuista vetyä on saatavilla, eli siinä ei ole arvoitettu todennäköisyyttä, jolla vetyinfrastruktuuria ylipäättään voi rakentua ja liikennelaadun vetyä markkinoille.

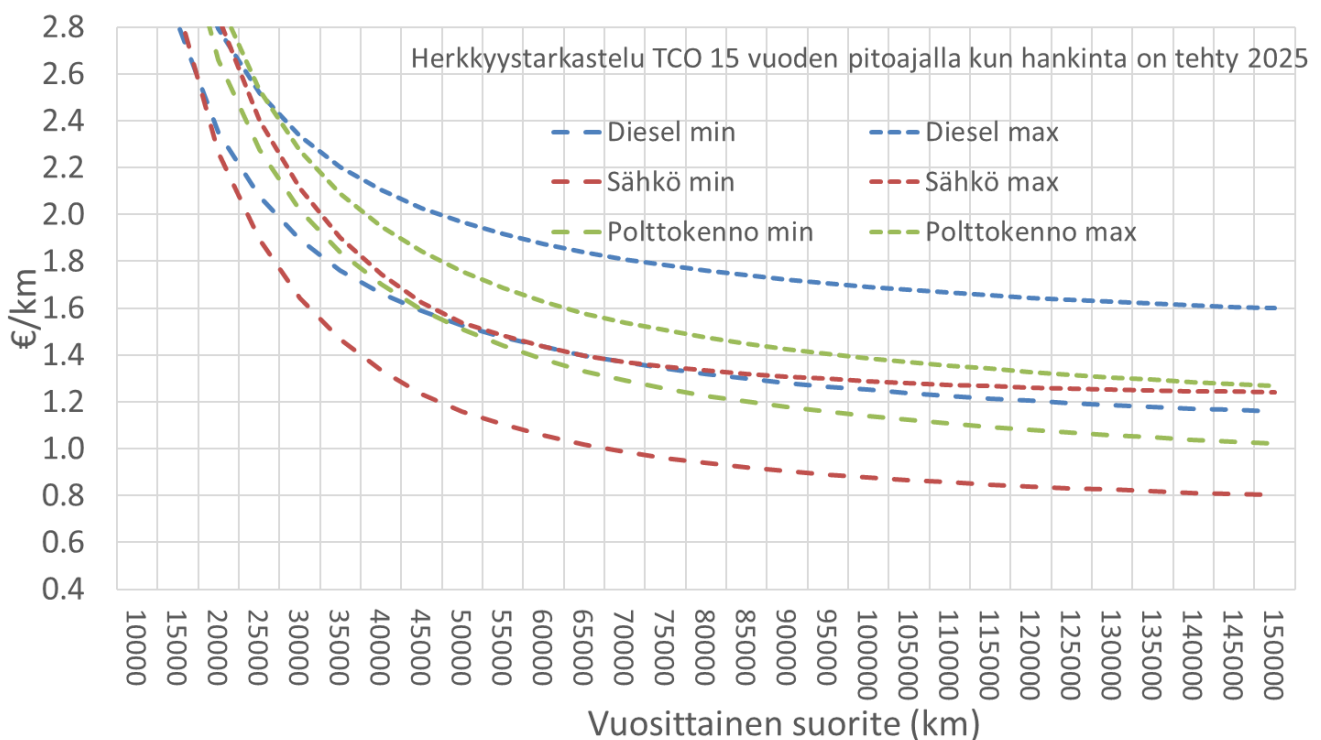
Alla taulukossa (Taulukko 10) esitettyjen valittujen skenaariomuuttujien suhteen tehtiin herkkyystarkastelu vuosille 2025 ja 2030. Kullekin käyttövoimalle laskettiin arvio minimi- ja maksimikäyristä käyttäen taulukossa esitettyjä oletuksia. Taulukon viimeisellä rivillä kuvattu sähköbussin energiankulutuksen kasvu haarukoi herkkyyttä kylmän kauden lämmitykseen liittyvästä sähkön kulutuksesta. Bussien lämmönhallinta on laaja kokonaisuus, jonka tarkempi optimointi täyssähköisesti vaatii lisätutkimusta. Pikalatauksessa käytetyn sähkön hinnalle oletettiin 50% lisähinta verrattuna varikkolataukseen kautta analyysin. Pikalatauksen sähkön markkinahinnan muodostumisessa on myös epävarmuuksia mutta niitä ei tarkasteltu; korkeamman pikaladatus sähkön hinnan vaikutus korostuu suurimmilla suoritteilla ja kulutuksilla.

Vuoden 2025 ja 2030 tarkasteluissa sähköbussien ennustetaan olevan kustannusviihkan alhaisin kaikilla suoritteilla ja huomioiden herkkyystarkastelun muuttujat. Suurin yksittäinen epävarmuus sähköbussien kokonaiskustannuksen osalta liittyy lämmönhallinnan toteuttamiseen nollapäästöisesti. Täyssähköisessä ratkaisussa nollapäästöinen lämmönhallinta suosii pikalatausta. Lämpöä tuottavat nollapäästöiset toimintamatkan jatkajat on vaihtoehto, jota ei tässä työssä tarkasteltu yksityiskohtaisesti. Akkuteknologia kehittyy jatkuvasti ja tulevan 10 vuoden aikana seuraavan sukupolven akuissa energiatiheys saattaa merkittävästi kasvaa, mikä pidentää sähköbussien toimintamatkaa ja saattaa suosia varikkoladattavia ratkaisuja.

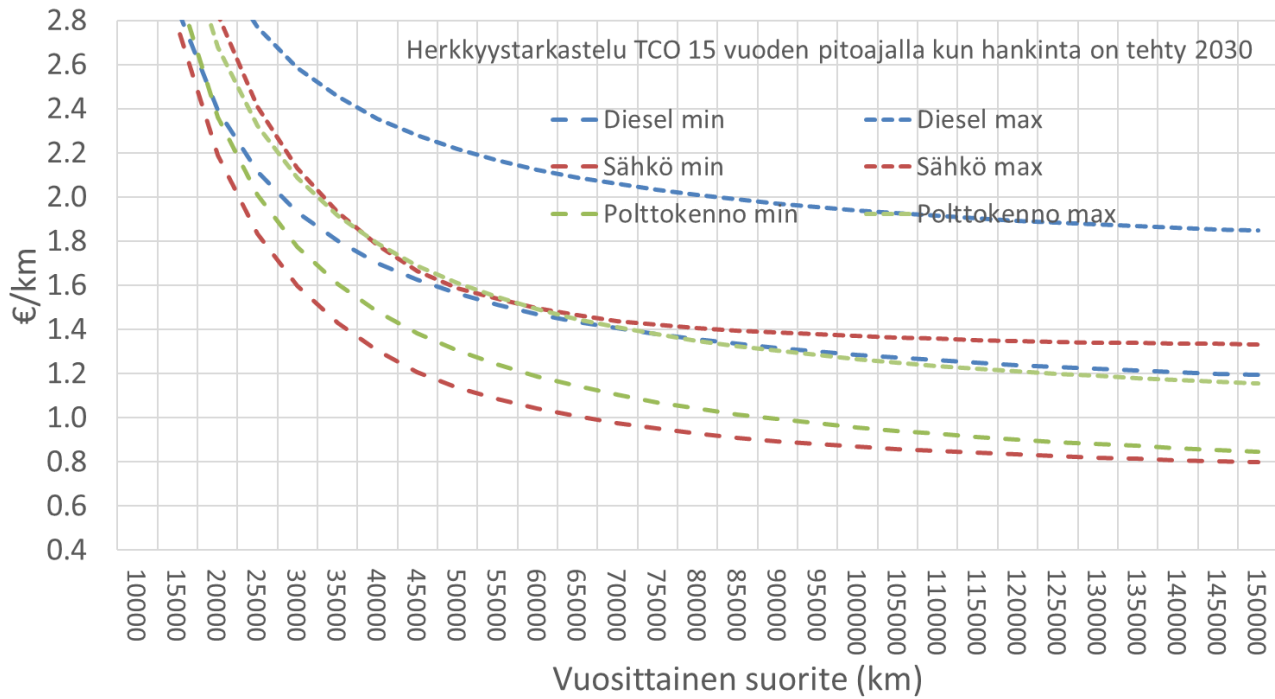
Vetypolttockenno lähestyy sähköbussin kustannustasoa tultaessa vuoteen 2030 erityisesti korkeimmilla kilometrisuoritteilla. Herkkyystarkastelussa oletettu vihreän vedyn hintakehitys -5%/vuosi on erittäin progressiivinen ja johtaa 15 vuoden jaksolle diskontatun vedyn hintaan alle 5 €/kg jo vuonna 2027. Dieselin suhteellinen kilpailukyky heikkenee suhteessa sähköön ja vetyyn koko tarkastelujaksolla ja kaikilla herkkyystarkastelun yhdistelmillä.

Taulukko 10: Herkkyystarkastelun varioidut parametrit verrattuna aiemmin esitettyyn perustapaukseen

	minimi	perustapaus	maksimi
Akun hinta €/kWh vuonna 2030	217	173	146
Dieselin hinnan nousu / v	0.5 %	1 %	2 %
HVO:n hinnan nousu / v	1 %	3 %	5 %
Sähkön hinnan nousu / v	1 %	2 %	3 %
Vedyn hinnan lasku / v	-5 %	-4 %	-2 %
Akun syklielinikä	4 %	2 %	1 %
Polttokennon elinikä	3 %	2 %	1 %
Sähköbussin energiankulutuksen kasvu täyssähköisen lämmityksen kautta			+20%



Kuva 11: Herkkyystarkastelu TCO:n kehittymisestä seutuliikenteen C-kalustolle 15 vuoden pitoajalla vuosittaisen ajosuorituksen mukaan, kun hankinta on tehty vuonna 2025.



Kuva 12: Herkkyystarkastelu TCO:n kehittymisestä seutuliikenteen C-kalustolle 15 vuoden pitoajalla vuosittaisen ajosuoritteen mukaan, kun hankinta on tehty vuonna 2030.



## 4. Johtopäätökset ja yhteenveto

---

Sähköbussit ovat analyysin mukaan kilpailukykyisiä ja alimman TCO:n kalustoa jo nyt kaikilla linjatyypeillä silloin, kun operoidaan linjalle tyypillistä autokiertoa uudella kalustolla. Tämän kilpailuedun odotetaan edelleen paranevan vuosikymmenen kuluessa. Aivan pienillä kilometrisuoritteilla diesel on edelleen kilpailukykyinen sähköön verrattuna, mutta tämäkin asetelma kääntyy sähköbussin eduksi lähivuosina ennakoitujen teknologia- ja markkinakehityksen kautta.

Vetybussit sijoittuvat arvioidun omistajan kokonaiskustannuksen osalta hyvin lähelle dieselbusseja jo nyt. Kahdesta vetybussikonfiguraatiosta range extender -vaihtoehto eli ladattavalla akulla varustettu voimalinja näyttyy puhdasta vetybussia edullisemmalla. Tämä johtuu siitä, että halvempaa ja energiatehokkaampaa täyssähköistä ajoa voidaan hyödyntää pienentämään polttoainekustannusta. On huomattava, että työssä ei analysoitu tarkemmin eri hybridivoimalinjoja mahdollisten sähkö-polttoainehybridien osalta, range extender komponenttien keskinäisen mitoituksen ja energianhallinnan suhteen. Jo pienelläkin polttoainekäytöllä voidaan tuoda joitakin erityisesti talvikäytössä saatavia etuja, erityisesti lämmöntuottoa käytettäväksi bussin sisätilan lämmitykseen. Täyssähköisessä ja nollapäästöisessä bussissa koko lämmönhallinta on hoidettava sähköisesti ilmalämpöpumppujen ja suoran sähkölämmityksen kautta. Tämä lisää sähkön kulutusta talvella ja johtaa suurempaan akuston kokovaatimukseen ja/tai kasvavaan tukeutumiseen käytönaikaiseen lataukseen. Ladattavan vetybussin (FC-REV) tapauksessa sähköisen operoinnin energiatehokkuus ja sähkön suhteellinen halpuus parantaa sen kilpailukykyä verrattuna vetypolttoainebussin sitä enemmän, mitä suurempi ladattavalla sähköllä ajamisen osuus on.

Katsottaessa kuvaajia keskimääräisen vuosisuoritteen mukaan voidaan havaita, että sähkö- ja vetybussien kustannuksen riippuvuus (kulmakerroin) suoritteen kasvaessa on pitkälti sama ja sähköbussit pysyvät halvimpana ratkaisuna aina suurimmille suoritteille saakka. On tärkeää huomata, että päivittäisen kilometrisuoritteen kasvaessa sähköbussit tulevat kasvavasti riippuvaisiksi käytönaikaisesta (pika)latauksesta. Pikaladattavan sähkön hinnan on analyysissä oletettu olevan 50% korkeampi kuin varikkoladattavan. Tämä kaventaa sähköbussien käyttövoiman kilpailuetua hieman. Toisaalta on huomattava, että oletettuun vihreän vedyn hintakehitykseen ja ylipäättään saatavuuteen liittyy tällä hetkellä suuria epävarmuuksia.

Sähköbussien rajoitteet tulevat erityisesti kohteissa, joissa vaadittu päiväsuorite on korkea, erityisesti jos pikalatauksen järjestäminen on hankalaa tai koetaan hankalaksi. Pikalataus käytön aikana vähentää bussioperaattorin autonomiaa ja operointi tulee osittain riippuvaiseksi toisen toimijan toteuttamasta infrastruktuurista.

Vetybussit ovat analyysin perusteella tällä hetkellä ja myös tulevilla vuosikymmenellä pääasiassa vaihtoehto dieselille. Tällä hetkellä ne ovat kalliimpia kuin diesel, mutta tulevan vuosikymmenen aikana vetybusseilla on potentiaalia nousta korvaajaksi dieselille. Vetybussien ennustettu suhteellinen kustannusten alenema on tarkastelluista vaihtoehdoista suurin, mikä johtuu tällä hetkellä keskeneräisestä teknologiasta. Suotuisimpien olosuhteiden ja kehityksen vallitessa voi vetybussi kokonaisratkaisun toimivuudessa lähentyä merkittävästi sähköbussia mutta analyysin perusteella ei saavuta sähköbussia kustannuskilpailukyvyssä. Vety nähdään siis selkeästi sähköä täydentävänä, ei korvaavana käyttövoimana.

Mikäli kokonaisjärjestelmän toimivuus saadaan riittäväksi, voi vetybussi tulla täydentäväksi vaihtoehdoksi pisimmillä reiteillä ja korkeimmilla suoritteilla, mikäli vetyinfra on saatavilla ja pikalatauksen järjestäminen on hankalaa. Voimassa oleva ja tuleva regulaatio tulee lähivuosina suosimaan käyttövoimina sekä sähköä että vetyä. Vedyn osalta liikennelaadun vedyn saatavuuteen tulee vaikuttamaan myös raskaiden maantiekuljetuksien kautta mahdollisesti syntyvä kysyntä.

Teknologia ei kuitenkaan ole vielä valmista ja tuotekehitykselle ja innovaatioille on vielä sijaa. Halutessa toteuttaa nimenomaan nollapäästöinen joukkoliikenne pohjoisiin oloihin, voi ajomatkaa pidentävä ja samalla lämpöä tuottava pienehkö vetyä tai metanolia käyttävä polttoainekäyttö (range extender) tuoda varteenotettavan vaihtoehdon. Teknologiakehitystä ja innovaatioita kannattaa seurata ja edistää, mutta



vuonna 2022 ei kannata jäädä odottamaan. Sähköbussit ovat teknologian ja markkinan puolesta valmiita otettavaksi hallittuna järjestelmäratkaisuna paikallisliikenteen käyttöön.





## Lähdeviitteet

---

ASSURED 2020; ASSURED 1.0 Interoperability Reference, <https://assured-project.eu/news-and-events/news/assured-1-0-interoperability-reference>

Aronsson, B., Eriksen, J., Grzelec, A., Ihonen, J., Jensen, T. L., Linnerud, K., Skúlason, J. B., Wiberg, E., NEXT NORDIC GREEN TRANSPORT WAVE – LARGE VEHICLES: Available by-product hydrogen in the Nordic countries, 2020.

Bisschop, R., Rosengren, M., Willstrand, O., Handling Lithium-Ion Batteries in Electric Vehicles: Preventing and Recovering from Hazardous Events, 2020, *Fire Technology*, doi: 10.1007/s10694-020-01038-1.

Bradley, T., Kurtz, J., Sprik, S., 2019, Review of transportation hydrogen infrastructure performance and reliability, *International Journal of Hydrogen Energy*, doi: 10.1016/j.ijhydene.2019.03.027.

Chatrou 2020; Chatrou Consultants show emerging trends in European Bus market, <https://fleet.ie/chatrou-consultants-show-emerging-trends-in-european-bus-market/>

CPEB 2022; Clean Bus Europe Platform, <https://cleanbusplatform.eu/>

Crowl, D., Jo, Y., The hazards and risks of hydrogen, 2007, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, doi: 10.1016/j.jlp.2007.02.002.

Element Energy – an ERM Group company, Commercialisation of hydrogen fuel cell buses, 2017.

Frost & Sullivan, Life Cycle and Total Cost of Ownership (TCO) Analysis of Heavy, Medium, and Light Duty Trucks in Europe, Global Automotive and Transportation Research Team at Frost & Sullivan, MFD2-18, February 2021.

Fuel Cell Electric Buses – Knowledge base, [luettu: 11.3.2022], URL: <https://www.fuelcell-buses.eu/wiki/safety-framework/general-hydrogen-safety-facts>.

Haavisto, J., Jenu, S., Paakkinen, M., Riskit sähköajoneuvojen latauksessa, 2020.

IEA 2021; Global EV Outlook 2021, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2021>

NEOT Oy, lausunto 19.2.2021, Fossiilittoman liikenteen tiekartta - luonnos valtioneuvoston periaatepäätökseksi kotimaan liikenteen kasvihuonekaasupäästöjen vähentämisestä, Lausuntopyyntönumero: VN/9996/2019, <https://www.lausuntopalvelu.fi/>

Phadke, A., Khandekar A., Abhyankar, N., Wooley, D., Rajagopal, D., Why Regional and Long-Haul Trucks are Primed for Electrification Now. Berkeley Lab, 2021. <https://eta-publications.lbl.gov/publications/why-regional-and-long-haul-trucks-are>

Pihlatie, M., Kukkonen, S., Halmeaho, T., Karvonen, V., Nylund, N-O., Fully electric city buses: The viable option, <http://www.vtt.fi/inf/julkaisut/muut/2014/OA-Fully-Electric.pdf>

Pihlatie, M., Laurikko, J., Naumanen, M., Wiman, H., Rökman, J., Pettinen, R., Paakkinen, M., Hajduk, P., Rahkola, P., Laukkanen, M., Sahari, A., Kaupallisten ajoneuvojen rooli liikenteen ilmastopolitiikassa (KAROLIINA), Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 2021:34, <https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/handle/10024/163098>

Ruf Y., Baum M., Zom T., Menzel A., Rehberger J., Study Report Fuel Cells Hydrogen Trucks, Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking, December 2020. <https://www.fch.europa.eu/publications/study-fuel-cells-hydrogen-trucks>





Sipilä, E., Kiuru, H., Jokinen, J., Saarela, J., Tamminen, S., Laukkanen, M., Palonen, P., Nylund N-O. ja Sipilä, K. (2018). Biopolttoaineiden kestävät toteutuspolut vuoteen 2030. Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 63/2018.

Yle Uutiset, Harjavaltaan rakennetaan vihreän vedyn tuotantolaitos – vähentää hiilidioksidipäästöjä merkittävästi, 2022a, [2.2.2022].

Yle Uutiset, Lahteen on suunnitteilla Suomen suurin vihreän vedyn tuotantolaitos – hintalappu on noin 250 miljoonaa euroa, 2022b, [19.1.2022].

**Certificate Of Completion**

Envelope Id: D01FFC8992BA42CEA3C51F62FD24699A	Status: Completed
Subject: DocuSign: VTT Paikallisliikenteen puhtaat käyttövoimat nyt ja tulevaisuudessa allekirjoi...	
Source Envelope:	
Document Pages: 33	Signatures: 1
Certificate Pages: 1	Initials: 0
AutoNav: Enabled	Envelope Originator:
Envelopeld Stamping: Enabled	Raija Ostrovskij
Time Zone: (UTC+02:00) Helsinki, Kyiv, Riga, Sofia, Tallinn, Vilnius	Vuorimiehentie 3, Espoo, .. . P.O Box1000,FI-02044
	Raija.Ostrovskij@vtt.fi
	IP Address: 130.188.17.16


**Record Tracking**

Status: Original	Holder: Raija Ostrovskij	Location: DocuSign
28 March 2022   13:13	Raija.Ostrovskij@vtt.fi	

**Signer Events**

Rafael Aman  
 rafael.aman@vtt.fi  
 Research Team Leader  
 Security Level: Email, Account Authentication  
 (None), Authentication

**Signature**

DocuSigned by:  
  
 BE346D6FEFB647B...  
 Signature Adoption: Pre-selected Style  
 Using IP Address: 188.238.95.197

**Timestamp**

Sent: 28 March 2022 | 13:16  
 Viewed: 28 March 2022 | 17:34  
 Signed: 28 March 2022 | 17:36

**Authentication Details**

SMS Auth:  
 Transaction: 25FF43CCD218010491955816107AC63D  
 Result: passed  
 Vendor ID: TeleSign  
 Type: SMSAuth  
 Performed: 28 March 2022 | 17:34  
 Phone: +358 40 5369381

**Electronic Record and Signature Disclosure:**  
 Not Offered via DocuSign

In Person Signer Events	Signature	Timestamp
<b>Editor Delivery Events</b>	<b>Status</b>	<b>Timestamp</b>
<b>Agent Delivery Events</b>	<b>Status</b>	<b>Timestamp</b>
<b>Intermediary Delivery Events</b>	<b>Status</b>	<b>Timestamp</b>
<b>Certified Delivery Events</b>	<b>Status</b>	<b>Timestamp</b>
<b>Carbon Copy Events</b>	<b>Status</b>	<b>Timestamp</b>
<b>Witness Events</b>	<b>Signature</b>	<b>Timestamp</b>
<b>Notary Events</b>	<b>Signature</b>	<b>Timestamp</b>
<b>Envelope Summary Events</b>	<b>Status</b>	<b>Timestamps</b>
Envelope Sent	Hashed/Encrypted	28 March 2022   13:16
Certified Delivered	Security Checked	28 March 2022   17:34
Signing Complete	Security Checked	28 March 2022   17:36
Completed	Security Checked	28 March 2022   17:36
<b>Payment Events</b>	<b>Status</b>	<b>Timestamps</b>