VERNE LIIKENTEEN TUTKIMUSKESKUS

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

TURUN AMMATTIKORKEAKOULU
TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Aalto-yliopisto

Heikki Liimatainen, Pasi Metsäpuro, Markku Ikonen, Rami Wahlsten & Antti Lajunen

Hybridibussit -

kokemuksia käyttöönotosta, liikennöinnistä ja energiankulutuksesta

Kansikuva: Risto Leino

ISBN 978-952-15-3250-4

Tampereen teknillinen yliopisto. Liikenteen tutkimuskeskus Verne.
Tutkimusraportti

Tampere University of Technology. Transport Research Centre Verne.
Research Report

Heikki Liimatainen, Pasi Metsäpuro, Markku Ikonen, Rami Wahlsten & Antti Lajunen

Hybridibussit -

kokemuksia käyttöönotosta, liikennöinnistä ja energiankulutuksesta

Tampereen teknillinen yliopisto. Liikenteen tutkimuskeskus Verne
Tampere 2014

Tiivistelmä

Diesel- ja sähkömoottorilla varustettuja hybridilinja-autoja on ollut liikenteessä jo yli kymmenen vuotta. Hybridibussit olivat markkinoille tullessaan huomattavasti kalliimpia hankintahinnaltaan kuin perinteiset dieselbussit, mutta hybriditeknologian kehittyessä niiden luotettavuus on parantunut ja hankintahinnat ovat alentuneet tehden niistä kilpailukykyisempiä vaihtoehtoja dieselbusseille. Hybridibussien valmistajat lupaavat kalustolleen merkittäviä energiatehokkuuden parannuksia verrattuna dieselbusseihin, mutta käytännön kokemuksia lupausten lunastumisesta on ollut vielä melko vähän. Tämä tutkimus tuo lisää tietoa tähän ja pyrkiikin vastaamaan tutkimuskysymykseen: ***Onko hybridibussien käyttö kaupunkien linjaliikenteessä kokonaistaloudellisesti kannattavaa?***

Tämän raportin pohjana toimii vuonna 2011 toteutettu kirjallisuusselvitys ja kysely hybridibussien käyttökokemusten kartoittamiseksi. Lisäksi tähän raporttiin on koottu tietoa esiselvityksen jälkeen toteutetusta hybridibussien seurantatutkimuksesta, jossa kartoitettiin käytännön kokemuksia hybridibusseilla liikennöinnistä, niihin liittyvästä kuljettajakoulutuksesta sekä seurattiin samoilla linjoilla olevien diesel- ja hybridibussien välisiä polttoaineen kulutuseroja. Bussien kulutuksia vertailtiin Helsingissä, Tampereella ja Turussa. Lisäksi tutkimuksessa luotiin simulointimalli, jonka perusteella arvioitiin ajosyklin ja reitin vaikutusta hybridibussien energiatehokkuuteen.

Kirjallisuustutkimuksen perusteella hybridibussien energiatehokkuus on merkittävästi parempi kuin dieselbusseilla. Tutkimusten mukaan hybridibussilla liikennöitäessä polttoaineenkulutus on 10-40 % pienempi kuin vastaavissa olosuhteissa liikennöidyllä dieselbussilla. Tässä tutkimuksessa tehdyllä simulointimallilla voitiin laskea, että optimaalisissa olosuhteissa hybridibussilla voidaan päästä dieselbussiin verrattuna 40 % pienempään polttoaineenkulutukseen. Samoin voitiin osoittaa, että ajosyklien ja bussireittien simulointitulokset osoittivat selkeästi, että ajosyklillä tai ajotavalla on merkittävä vaikutus kaupunkihybridibussin energiankulutukseen.

Helsingissä tehdyn seurannan perusteella hybridibusseilla polttoaineenkulutus on 18–25 % pienempi kuin dieselbusseilla kun vastaava luku Turussa oli 36 %. Tampereella havaittiin, että tankattujen polttoainemäärien perusteella polttoaineenkulutus 14 % pienempi hybridibusseilla. Lisäksi havaittiin, että liikennöinnin keskinopeudella on vaikutusta polttoaineenkulutuksen eroihin diesel- ja hybridibussin välillä. Mitä hitaampi eli mitä enemmän jarrutuksia ja kiihdytyksiä sisältävä linja on kyseessä, sitä suuremmat säästöt hybridibussilla saadaan. Lisäksi sekä simuloinnissa että kerättyä dataa analysoitaessa tehtiin sama havainto, että kuljettajan ajotavalla on enemmän vaikutusta dieselbussin polttoaineenkulutukseen kuin hybridibussilla.

Tutkimuksessa oli myös tavoitteena selvittää, vodaanko polttoaineensäästöä saavuttaa kuljettajien yleistä taloudellisuusajotietoisuutta lisäämällä sekä perehdyttämällä heitä erityisesti ajotapaan, jolla hybriditekniikan tarjoama taloudellisuus pystytään hyödyntämään maksimaalisesti. Lisäksi kuljettajakoulutuksen yhteydessä arvioitiin kolmea erilaista ajotapaa ja niiden vaikutusta polttoaineenkulutukseen. Tutkimuksessa havaittiin, että kahtena peräkkäisena ajanjaksoina tehtyjen havaintojen perusteella keskimääräinen koulutuksen aikaansaama säästö oli 1,3 %.

Hybridibussien kokonaistaloudellisen kannattavuuden selvittämiseksi luotiin investointilaskuri. Investointilaskuri osoitti, että hybridibussien kokonaistaloudellisuuteen vaikuttaa paljon epävarmuustekijöitä. Tämän takia ei vielä yksiselitteisesti voida osoittaa hybridibussien kannattavuutta. Investointilaskurissa käytetyillä arvoilla todettiin, että hybridibussin polttoaineenkulutuksen pitäisi olla vähintään 23 %:a pienempi, jotta hybridibussi tulisi dieselbussia kannattavammaksi 15 vuoden aikana elinkaarikustannukset huomioden.

Sisällysluettelo

1. Johdanto.....6
2. Kirjallisuusselvitys.....9
2.1 Hybridibussien tekniikka- ja markkinatilanneselvitys Euroopassa.....9
2.2 Hybridibussien suorituskyky.....10
3. Kysely hybridibussien käyttökokemuksista.....12
4. Ajosyklin ja reitin vaikutuksen arvioiminen hybridibussien energia-tehokkuuteen simuloinnin avulla.....14
4.1 Bussireittien mittaus ja mittausdatan käsittely.....14
4.2 Mitattujen tietojen ja reittien analyysi.....19
4.3 Ajosyklin vaikutuksen arviointi.....20
4.4 Simulointitulokset.....22
5. Polttoaineenkulutuksen seuranta.....25
5.1 Helsinki.....25
5.2 Tampere.....26
5.3 Turku.....26
6. Hybridibussien optimaalinen ajotapa ja kuljettajakoulutus.....31
6.1 Kuljettajakoulutuksen tausta.....31
6.2 Teoriakoulutuksen toteutus ja sisältö.....31
6.3 Käytännön koulutuksen toteutus.....33
6.4 Linjan 3 ja 30 simulointi Turun Artukaisissa.....34
6.5 Kuljettajakoulutusten vaikutukset.....36
7. Käytännön kokemuksia hybridibusseista.....37
8. Kokonaistaloudellinen kannattavuus.....38
8. Päätelmät.....40
Lähteet.....41

1. Johdanto

Korkea hankintahinta on hidastanut hybridibussien yleistymistä

Diesel- ja sähkömoottorilla varustettuja hybridilinja-autoja on ollut liikenteessä jo yli kymmenen vuotta. Hybridibussit olivat markkinoille tullessaan huomattavasti kalliimpia hankintahinnaltaan kuin perinteiset dieselbussit, joten niiden yleistyminen on ollut hidasta. Hybriditeknologian kehitys on parantanut hybridibussien luotettavuutta ja laskenut niiden hankintahintaa lähemmäksi dieselbusseja. Hybridibussien hankintaa aikovien liikennöitsijöiden tapauksessa avainkysymys onkin, ovatko hybridibussit elinkaarikustannuksiltaan kilpailukykyinen vaihtoehto dieselbusseille?

Syyskuussa 2010 tehdyn joukkoliikenteen energiatehokkuuskyselyn vastaajista yksikään ei ollut ottanut hybridibusseja käyttöön. 19 % vastaajista oli arvioinut hybridibussien käyttöönottoa, mutta päättänyt, että hybridejä ei vielä oteta käyttöön. Tulevaisuuden arvioissa vuoteen 2016 vastaajista 3,6 % piti erittäin todennäköisenä ja 11 % melko todennäköisenä, että heillä on käytössään hybridibusseja. Hybridibussien käytön todennäköisyys oli selvästi suurempaa kaupunkiliikennettä harjoittavissa yrityksissä kuin vakiovuoro- tai tilausajoliikennettä harjoittavissa yrityksissä. Kaupunkiliikenteen tilaajat puolestaan arvioivat, että vuonna 2016 hybridibusseilla ajetaan liikenteestä 15 % Tampereella, 25 % Helsingissä ja 30 % Turussa ja Lahdessa. (Metsäpuro et al. 2011.)

Suomessa Kabus on kehittänyt omaa kevytrakenteista hybridibussiaan ja bussi on alustadynamometritesteissä saavuttanut 40 % alemman polttoaineenkulutuksen keskiverto dieselbussiin verrattuna (Mutanen 2009). Kabusin hybridibussi ei kuitenkaan ole vielä linjaliikenteessä, vaan ensimmäisenä Suomessa otettiin linjaliikenteeseen neljä Volvon valmistamaa hybridibussia Turussa kesällä 2011 (YLE Turku 2011). Helsingin seudun liikenteessä puolestaan aloitti liikennöinnin kaksi Volvon hybridibussia vuodenvaihteessa 2011–2012 (HSL 2011). Hybridibussi on pyritty erottamaan muusta kalustosta erityisteippauksilla (kuvat 1 ja 2).

Hybridibussit Suomessa

Suomessa Kabus on kehittänyt omaa kevytrakenteista hybridibussiaan ja bussi on alustadynamometritesteissä saavuttanut 40 % alemman polttoaineenkulutuksen keskiverto dieselbussiin verrattuna (Mutanen 2009). Kabusin hybridibussi ei kuitenkaan ole vielä linjaliikenteessä, vaan ensimmäisenä Suomessa otettiin linjaliikenteeseen neljä Volvon valmistamaa hybridibussia Turussa kesällä 2011 (YLE Turku 2011). Helsingin seudun liikenteessä puolestaan aloitti liikennöinnin kaksi Volvon hybridibussia vuodenvaihteessa 2011–2012 (HSL 2011). Hybridibussi on pyritty erottamaan muusta kalustosta erityisteippauksilla (kuva 1).

Kuva 1. Volvo 7700 -hybridibussi Turun kauppatorin laidalla. Oikealla matkustajia informoiva sisäteippaus.

Volvo hyödyntää rinnakkaisteknologiaa hybridibusseissaan

Volvo 7700 Hybrid -bussin hybridijärjestelmän pääkomponentit on esitetty alla kuvassa 3. Hybridijärjestelmä on periaatteeltaan rinnakkainen, eli sekä diesel- että sähkömoottorilta on mekaaninen yhteys vetopyöriin. Näin on voitu valita tavanomaista pienempi ja taloudellisempi dieselmoottori, koska sähkömoottori avustaa sitä esim. kiihdytettäessä. Toisaalta taas hyvin kevyillä kuormilla autoa voidaan liikuttaa pelkällä sähkömoottorilla. Sähkömoottori alkaa kevyissä jarrutuksissa toimia generaattorina, tulee raskaammaksi pyörittää, hidastaa auton nopeutta ja tuottaa samalla sähköä akustoon taltioitavaksi (ns. regenerointi). Vasta suurempaa hidastuvuutta tarvittaessa otetaan normaalit kitkajarrut käyttöön.

Volvon ilmoituksen mukaan järjestelmä mahdollistaa jopa 30 %:n polttoaineensäästön tavanomaiseen dieselvaihtoehtoon verrattuna. Sen tuomiin etuihin ilmoitetaan kuuluvan myös pienemmät pakokaasupäästöt. Volvo ei tosin kerro, mitä pakokaasukomponentteja tarkoitetaan. Maininta pätee lähinnä CO2:een. Etuina ilmoitetaan myös nollapäästöinen paikallaan seisominen ja hiljainen liikkeellelähtö.

Alla olevassa kuvassa esiintyvän numeroinnin selitteet:

1. Dieselmoottori

2. Kytkin

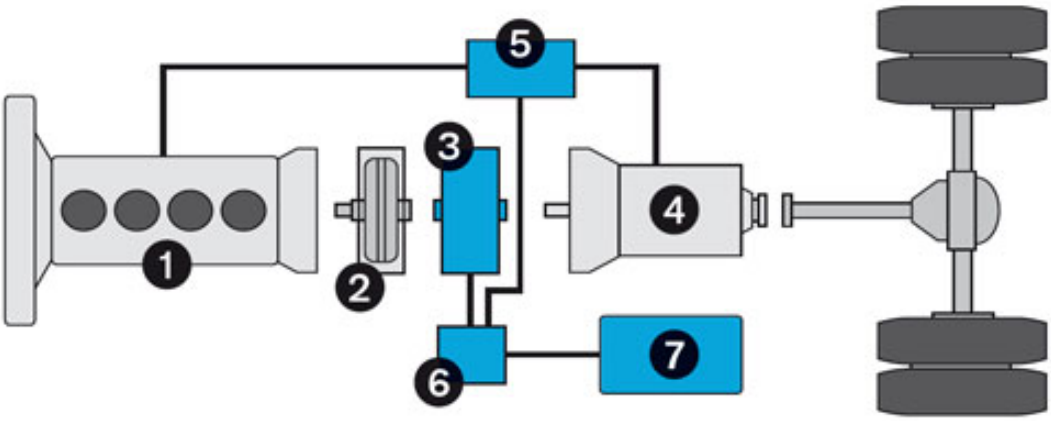
3. Sähkömoottori/generaattori

4. Vaihteisto

5. Elektroninen ohjainyksikkö

6. DC/AC-muunnin

7. Akusto



Kuva 2. Volvo 7700 Hybrid -bussin hybridijärjestelmän pääkomponentit (Tekniikka & Talous 2011)

Hybridibussien kokonaistaloudellisuus selvityksen alle

Hybridibussien käyttöönoton tukemiseksi Tampereen Joukkoliikenne, TKL ja TransEco-tutkimusohjelma tilasivat syksyllä 2011 esiselvityksen Liikenteen tutkimuskeskus Verneltä. Tutkimuksen tarkoituksena oli selvittää kirjallisuusselvityksen (luku 2) ja kyselyjen (luku 3) avulla käyttökokemuksia ja kustannustietoa hybridibussien käyttöönotosta ja liikennöinnistä. Esiselvityksen pohjalta keväällä 2012 edellä mainitut tahot yhdessä Turun joukkoliikenteen ja HSL:n kanssa tilasivat Verneltä, Turun ammattikorkeakoululta ja Aalto-yliopistolta hybridibussien seurantatutkimuksen. Tutkimukseen sisältyi Aalto-yliopiston toteuttama hybridibussien energiankulutuksen mallinnus ja simulointi (luku 4), Vernen toteuttama todellisen polttoaineenkulutuksen seuranta ja siihen vaikuttavien tekijöiden analyysi Turussa, Tampereella ja Helsingissä (luku 5), sekä Turun AMK:n toteuttama kuljettajakoulutus Turun kaupunkiliikenteen kuljettajille (luku 6). Seurannan aikana ja tutkimuksen työpajassa 6.6.2013 kerättyjä kokemuksia hybridibusseista on esitelty luvussa 7. Tutkimuksessa kerättyjen tietojen pohjalta tehtiin investointilaskuri, jonka avulla voidaan verrata diesel- ja hybridibussien elinkaarikustannuksia (luku 8). Tutkimuksen tavoitteena on vastata tutkimuskysymykseen: ***Onko hybridibussien käyttö kaupunkien linjaliikenteessä kokonaistaloudellisesti kannattavaa?***

Kuva 3. Tampereella Solaris-hybridibussit ovat liikennöineet pääosin linjoilla 21 ja 25 sekä viikonloppuisin linjalla 5.

Tampereella käytössä olevan Solaris Urbino -hybridibussin tärkeimmät tekniset tiedot on esitetty alla (Solaris 2013).

Pituus: 12.9 m

Hybridijärjestelmä: Rinnakkainen Eaton HDU (TA-C84)

Leveys: 2.55 m

Dieselmoottori: Cummins ISB, 6.7 dm3, 209 kW

Sähkömoottori: 44 kW max

Kuva 4. Helsingissä Volvo 7700 -rinnakkaishybridi on liikennöinyt linjalla 24 vuoden 2012 alusta lähtien.

Turussa ja Helsingissä käytössä olevan Volvo 7700 -hybridibussin tärkeimmät tekniset tiedot

Pituus: 12.0 m

Hybridijärjestelmä: Rinnakkainen Volvo I-SAM

Korkeus: 3.2 m

Dieselmoottori: Volvo D5, 4.76 dm3, 161 kW, 800 Nm

Leveys: 2.55 m

Sähkömoottori: 70/120 kW, 400/800 Nm (jatkuva/max)

Akseliväli: 5.95 m

Vaihteisto: Automatisoitu I-SHIFT

Kokonaismassa: 18 900 kg

Vaihteet: 12 vaihdetta

2. Kirjallisuusselvitys

Hybridibusseissa kaksi vaihtoehtoista teknologiaa

Hybridibusseja on kaksi päätyyppiä, sarja- ja rinnakkaishybridi. Sarjahybridissä dieselmoottori ei ole suoraan yhteydessä vetäviin pyöriin vaan dieselmoottori pyörittää generaattoria, jonka tuottama sähköenergia ohjataan käyttöön sähkömoottorin kautta tai varastoidaan akkuihin. Sarjahybridissä dieselmoottorista saadaan korkea hyötysuhde sen käytön optimoinnin avulla. Sarjahybridissä on myös melko yksinkertainen voimalinjan ohjaus ja hyvä suorituskyky alhaisissa nopeuksissa. Sarjahybridin haittoja ovat suuret energiahäviöt ja järjestelmä paino. Rinnakkaishybridissä sekä sähkömoottori, että dieselmoottori ovat yhteydessä vetäviin pyöriin. Järjestelmä on kevyempi kuin sarjahybridi ja toimii tehokkaammin nopeuden kasvaessa, mutta järjestelmän ohjaus on monimutkaisempaa ja jarrutusenergiaa ei saada yhtä tehokkaasti talteen kuin sarjahybridissä.

Rinnakkais- ja sarjahybridien parhaita ominaisuuksia voidaan myös yhdistää kahden vaihteiston järjestelmällä, mutta järjestelmän ohjaus on hyvin monimutkaista. (Clark et al. 2009.) Sarja- ja rinnakkaishybrideillä saavutettava polttoaineenkulutuksen pieneneminen verrattuna dieselbussiin riippuu reitin keskinopeudesta. Pienillä nopeuksilla sarjahybridi on parempi, mutta nopeuden kasvaessa yli 20 km/h rinnakkaishybridillä saavutetaan suuremmat säästöt. (Jobson 2010.) Kaikki tutkimuksessa mukana olevat hybridibussit ovat rinnakkaishybridejä.

Energiaa voidaan varastoida joko akkuihin tai kondensaattoreihin

Hybridibusseissa käytetään jarrutusenergian talteenottoon pääosin kahta ratkaisua, akkuja tai kondensaattoreita. Kondensaattorit sopivat hyvin alhaisen keskinopeuden linjalle, jossa on paljon pysähdyksiä, jolloin kondensaattoreiden nopea lataus ja purku toimivat parhaiten. Kondensaattoreiden käyttöiän arvioidaan olevan jopa kaksi kertaa pidempi kuin akkujen. (Lammert 2008.) Akkujen käyttöikä, ominaisuudet ja kustannukset riippuvat akkutyypistä. Lyijyakkujen käyttöiäksi arvioidaan noin 50000 kilometrin vuotuisella ajosuoritteella 2-4 vuotta, nikkelimetallihybridiakkujen (NiMH) puolestaan 5-7 vuotta ja litiumioniakkujen yli 6 vuotta. Lyijyakkupaketin vaihto maksaa noin 19000 € ja NiMH-akun puolestaan noin 30000 €. (BAE Systems 2012; Clark et al. 2007; Transports Canada 2009.) Akkujen todellista käyttöikää on kuitenkin epäilty lyhyemmäksi ja käyttöikä riippuu merkittävästi akkujen käyttöprofiilista (Kellaway 2007). Tutkimuksessa mukana olevissa hybridibusseissa on käytössä litiumioniakustot.

2.1 Hybridibussien tekniikka- ja markkinatilanneselvitys Euroopassa

Osana hanketta tehtiin eurooppalaisten hybridibussien tekniikka- ja markkinatilanneselvitys. Tämä toteutettiin AMK-insinööritutkinnon opinnäytetyönä, ja sen teki Teemu Vuorensola Turun ammattikorkeakoulussa. Selvityksen pääasialliset havainnot olivat, että hybridibusseja on pienessä määrin valmistanut yllättävän moni valmistaja ympäri Eurooppaa, ja että sarjahybridiperiaate näyttäisi olevan kaupunkibussikäytössä yleisempi valinta kuin rinnakkaishybridi.

Euroopan markkinoilla toimii parikymmentä hybridibussien valmistajaa, joista merkittävimmät ovat Daimler/EvoBus, Volvo, MAN, Irisbus Iveco, Solaris, Hess ja Van Hool. Hybridibusseja on käytössä tai kokeilukäytössä kymmenissä eurooppalaisissa kaupungeissa. (Koskue & Talka 2010.) Monet esille tulleista hybridibussivalmistajista ovat Suomessa täysin tuntemattomia, kuten kuvasta 5 ilmenee. Valmistusmääriä ja käytössä olevien bussien määriä selvitettäessä havaittiin, että tällaista tietoa on erittäin huonosti saatavissa. Näin ollen Euroopassa kaikkiaan käytössä olevien hybridibussien määrää on erittäin vaikea arvioida. Hybridibussien valmistajien ja käyttäjien yhteistyön parantamiseksi ja bussien teknisen kehityksen edistämiseksi on Euroopan komission tuella perustettu Hybrid User Forum -yhteisö (HUF 2012), joka on tehnyt jäseniensä keskuudessa kyselyn hybridibusseihin liittyvistä odotuksista ja käytännön kokemuksista. Kyselyyn vastanneiden mielestä tärkeimmät syyt hybridibussien hankkimiseen ovat hiilidioksidipäästöjen vähennystavoitteet, operatiivisten kustannusten pienentäminen ja puhtaamman teknologian tuoma julkisuuskuvan parantuminen. Vastaajat olivat valmiita maksamaan hybridibussista keskimäärin 26 % enemmän kuin

SISÄLTÖ

1 JOHDANTO 6
2 HYBRIDIBUSSI 7
2.1 Hybriditekniikka 7
2.1.1 Rinnakkaishybridi 7
2.1.2 Sarjahybridi 8
2.1.3 Power Split -hybridi 9
2.2 Hybriditekniikka linja-autoissa 10
2.2.1 Akusto 10
2.2.2 Jarrutusenergian talteenotto 12
3 KÄYTÖN SYITÄ 13
4 EUROOPPALAISET VALMISTAJAT 16
4.1 VDL Bus & Coach (Alankomaat) 17
4.2 Van Hool (Belgia) 17
4.3 Tata Hispano (Espanja) 17
4.4 Carrocera Castrosua (Espanja) 18
4.5 Alexander Dennis (Iso-Britannia) 18
4.6 Optare (Iso-Britannia) 18
4.7 Wrightbus (Iso-Britannia) 19
4.8 Irisbus IVECO (Italia, Ranska) 19
4.9 Solaris Bus & Coach (Puola) 19
4.10 Heuliez Bus (Ranska) 20
4.11 Volvo (Ruotsi) 20
4.12 MAN (Saksa) 20
4.13 Mercedes-Benz (Saksa) 21
4.14 Hess (Sveitsi) 21
4.15 Temsa (Turkki) 21
4.16 Belkommunmash (Valko-Venäjä) 22
4.17 Muut toimijat 22
5 HYBRIDIBUSSIEN KÄYTTÖ EUROOPASSA 23
5.1 Suomi 23
5.2 Ruotsi 24
5.3 Iso-Britannia 24
5.4 Saksa 24
5.5 Muut maat 25
6 KULUTUS- JA KUSTANNUSHYÖDYT 26
7 TULEVAISUUS 29
8 YHTEENVETO 30
LÄHTEET 32
LIITTEET

Kuva 5. Euroopan hybridibusseja koskeneen raportin sisällysluettelo (AMK-insinööri Teemu Vuorensolan opinnäytetyö)

tavallisesta dieselbussista, mutta ulkopuolisen rahoituksen, poliittisen paineen tai polttoaineen hinnan nousun vuoksi korkeammatkin hankintakustannukset voivat olla hyväksyttäviä. 30 vastaajan keskuudessa selvästi suurin kysyntä on 2-akselisille busseille. Ennen hybridibussien hankintaa vastaajat olivat odottaneet, että huoltokustannukset ovat hieman pienemmät kuin dieselbusseilla, mutta käytössä oli havaittu, että huoltokustannukset ovat samansuuruiset tai hieman suuremmat. Samoin polttoainesäästöjen osalta odotukset olivat korkeammalla (keskimäärin 23 % säästö) kuin todelliset säästöt (keskimäärin 16 % säästö). Suurin osa vastaajista oli seurannut polttoaineenkulutusta omilla menetelmillään normaalissa liikennekäytössä. Kuljettajien koulutuksen vastaajat näkivät hyvin merkittävänä tekijänä polttoainesäästöjen realisoimisessa. (HUF 2012.).

2.2 Hybridibussien suorituskyky

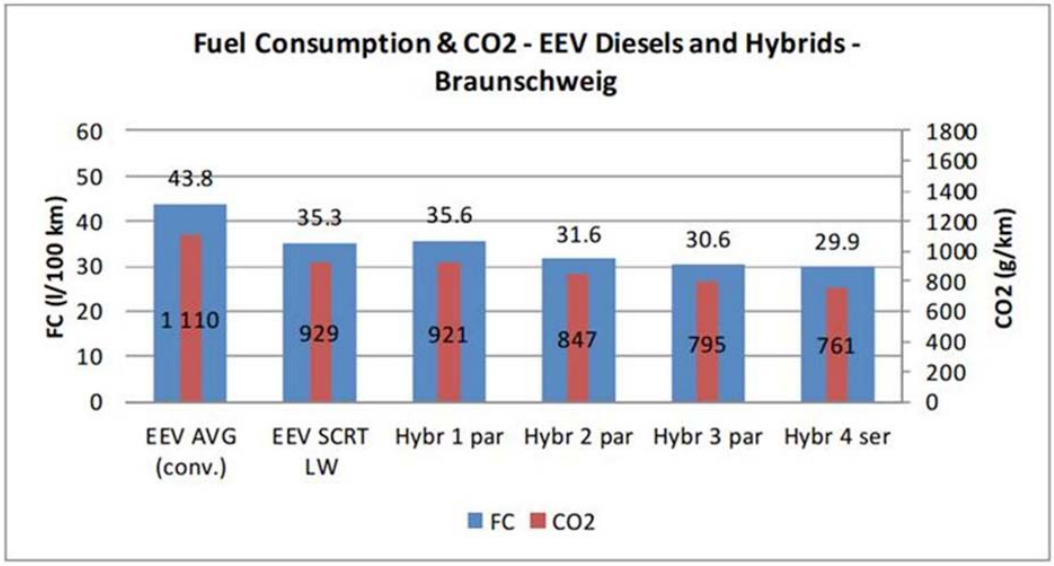
Referenssejä hybridibusseilla saavutettavissa olevista kulutuslukemista kaupunkikäytössä saadaan VTT:n mittaustuloksista (kuva 6). Kuvassa on esitetty sinisellä pylväällä poltto¬aineenkulutus, ja sen sisällä oleva punainen pylväs kuvaa CO2-päästöä.

VTT:n mittauksissa käytetty Braunschweig-ajosykli on Euroopassa yleisesti kaupunkibussien mittauksissa käytetty sykli, joka on melko raskas eli sisältää runsaasti pysähdyksiä ja liikkeellelähtöjä. Mitattujen autojen joukossa oli vertailutasona EEV-päästöluokituksen mukainen tavanomainen dieselbussi sekä kevytraken¬teinen dieselbussi (merkintä “LW” = light-weight). Kyseinen bussi oli varustettu SCR-pakokaasunpuhdistusjärjestelmällä, joka on yhdistelmä NOX:ia puhdistavasta SCR-järjestelmästä (Selective Catalytic Reduction) sekä lähinnä partikkelien puhdistukseen kehitetystä CRT-järjestelmästä (Continuosly Regenerating Trap). Mittauksissa käytetyistä hybridibusseista kolme oli rinnakkaishybridiä (merkintä “par”) sekä yksi sarjahybridi (merkintä “ser”). Mielenkiintoista on havaita, että suurin hybridibussikulutus ei ollut pienempi kuin kevytrakenteisen dieselbussin kulutus. Koko mittausryhmän pienin kulutuslukema oli juuri alle 30 l/100 km, ja se mitattiin sarjahybridille. Tampereen Solaris-hybridibussi mitattiin tutkimuksen aikana myös VTT:n tutkimuslaboratoriossa ja keskikulutus oli Braunschweig-syklissä 34,8 l/100km.

Erityisesti Pohjois-Amerikassa on seurattu useissa kaupungeissa hybridibussien suorituskykyä linjaliikenteessä. Jo vuosina 1999–2001 New Yorkissa vertailtiin hybridi- ja dieselbussien suorituskykyä. Tuolloin 2-akselisten hybridibussien tekniikassa oli huomattavasti enemmän ongelmia kuin dieselbussien ja huoltokustannukset olivatkin 70–150 % suuremmat. Polttoainekustannukset puolestaan olivat 9 % pienemmät ja laboratoriotesteissä NOx- ja hiukkaspäästöt olivat noin puolet pienemmät kuin dieselbusseilla. Kuljettajien mielestä hybridibussit kiihtyivät paremmin ja jarrutus oli tasaisempi kuin dieselbusseilla. Matkustajien mielestä melutaso oli puolestaan alhaisempi. (Chandler et al. 2002.) Seattlessa vuosina 2005–2006 tehty vertailu puolestaan osoitti hybriditekniikan luotettavuuden ja suorituskyvyn parantuneen selvästi New Yorkin kokemuksiin verrattuna. Huoltokustannukset olivat nyt nivelhybridibusseilla 4 % pienemmät kuin dieselbusseilla, vaikka vikaantumisväli oli hybridibusseilla 16 % lyhyempi. Polttoainekustannukset olivat puolestaan 22 % pienemmät. (Chandler & Walkowicz 2006.)

Long Beachin vertailussa vuosina 2005–2007 sen sijaan bensiinihybridibussin polttoainekustannukset olivat 14 % korkeammat kuin dieselbussin. Huoltokustannukset taas olivat bensiinihybridillä 43 % pienemmät. Suuri ero huoltokustannuksissa johtui pääosin jarrujen huomattavasti pienemmästä huoltotarpeesta. Vikaantumisväli oli bensiinihybrideillä 18 % lyhyempi kuin dieseleillä. (Lammert 2008.)

Iowassa koulubussien vertailussa 2008–2010



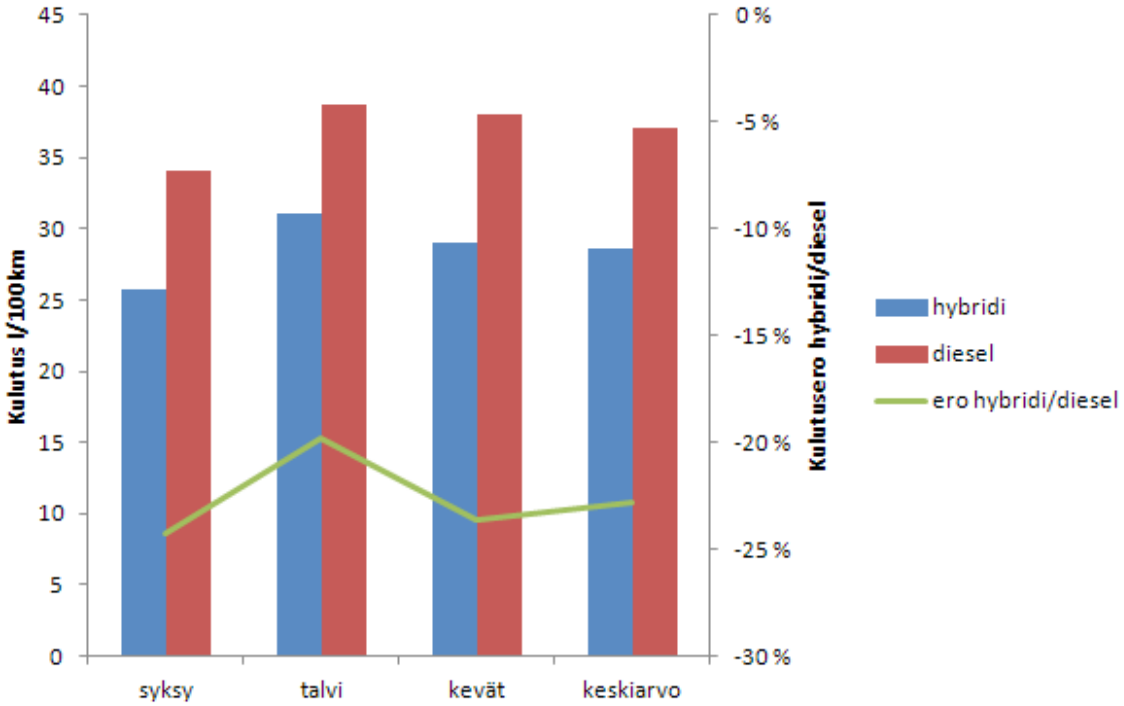
Kuva 6. VTT:n mittaamia hybridibussikulutuksia Braunschweig-ajosyklillä (Nylund & Koponen 2012).

hybridibussin polttoaineenkulutus oli noin 25 % pienempi kuin dieselbussin ja huoltokustannukset 12 % pienemmät. Iowan vertailussa havaittiin, että talvella hybridibussin polttoainesäästö oli noin 4 prosenttiyksikköä pienempi kuin keväällä tai syksyllä, eli lämpötilan vaihteluilla oli vaikutusta (kuva 7). Talvella myös huomattiin, että hybridibussin käyttäessä pääosin sähköä ajamiseen polttomoottori ei tuottanut tarpeeksi lämpöä matkustamon lämmittämiseen. (Hallmark et al. 2010.)

Kanadalaisissa tutkimuksissa hybridibussin polttoaineenkulutuksen on havaittu olevan 10–40 % pienempi kuin dieselbussin. Muita hyötyjä ovat olleet (Transports Canada 2009):

- ***melutason lasku pienemmästä polttomoottorista ja alhaisemmista kierrosluvuista johtuen***
- ***jarrujen kulumisen väheneminen***
- ***polttomoottorin huoltotarpeen väheneminen***
- ***parempi kiihtyvyys***
- ***matkustusmukavuuden paraneminen tasaisemman ajon vuoksi***
- ***lähipäästöjen pieneneminen***

Hybridibussien haittapuolina puolestaan nähdään kallis hankintahinta, akkujen korkea hinta ja käyttöiän epävarmuus sekä huoltokäytäntöjen muutokset, kuten uusien osien ja työkalujen tarve sekä akkujen käsittelylaitteiden tarve, erityisesti jos akut on sijoitettu bussin katolle (Transports Canada 2009).



Kuva 7. Hybridi- ja dieselbussien polttoaineenkulutuksen vaihtelu vuodenaikojen mukaan (Hallmark et al. 2010).

3. Kysely hybridibussien käyttökokemuksista

Tavoitteena eurooppalaisten käyttökokemusten kartoitus

Eurooppalaisten käyttökokemusten saamiseksi Liikenteen tutkimuskeskus Verne toteutti kyselytutkimuksen, joka oli suunnattu eurooppalaisille hybridibussien valmistajille, tilaajaorganisaatioille ja operaattoreille. Kyselyn vastaajat valittiin kirjallisuusselvityksessä esiin tulleista tahoista, joille löydettiin internetistä sähköpostiosoite. Valmistajille, tilaajille ja operaattoreille tehtiin omat kyselynsä, joissa oli kuitenkin mukana yhteisiä kysymyksiä. Kyselyyn kutsuttiin vastaamaan 11 valmistajaa, 8 tilaajaa ja 30 operaattoria. Vastauksia saatiin internetin kautta 3 tilaajalta ja 5 operaattorilta. Valmistajien näkemyksiä selvitettiin puhelimitse hybridibussien suomalaisilta maahantuojilta, kun internetkyselyyn ei tullut vastauksia.

Valmistajat arvioivat hybridi- ja diesel-bussien hintaeron kaventuvan lähivuosina

Kyselyyn saatiin vastaukset yhteensä kolmelta hybridibusseja valmistavan yrityksen maahantuojan edustajalta, joita olivat Volvo, MAN (Kesko) ja Mercedes-Benz (Veho). Valmistajien mukaan hybridibussien hankintahinta vastaaviin dieselbusseihin verrattuna on noin 30-50 % korkeampi. Viiden vuoden aikajänteellä hybridi- ja dieselbussien hinnaneron uskottiin kaventuvan noin 20 %:iin. Markkinatilanteen epävarmuutta kuvaa se, että valmistajat eivät osanneet arvioida hybridibussien myyntimäärien kehitystä tai korimallien tarjontaa seuraavan viiden vuoden aikana.

Sarjahybriditeknologian eduiksi vastaajat mainitsivat joustavan polttomoottorin käytön, joka mahdollistaa korkean hyötysuhteen kaupunkiajossa. Sarjahybriditekniikan eduksi laskettiin myös yhteensopivuus polttokennon kanssa. Vastausten mukaan sarjahybridin tekniikka on rinnakkaishybridiä kalliimpaa ja sähkömoottorin vikaantuessa sarjahybridibussilla ei voi liikennöidä. Nivelhybridin eduiksi kaksiakseliseen bussiin verrattuna mainittiin lisäksi se, että energiaa voidaan ottaa talteen kaikilta akseleilta, jolloin jarrutusenergiasta voidaan hyödyntää suurempi osa ja lisäksi luistovaara on pienempi.

Valmistajat kertoivat tarjoavansa kuljettajille koulutuspäivää, joissa harjoitellaan taloudellista ajotapaa ja lisäksi koulutuksen yhteydessä kerrotaan korjauksen ja huollon erityispiirteistä. Valmistajien mukaan hybridibussit myydään pääsääntöisesti huoltosopimuksen kanssa. Kaksi vastaajista kertoi käyttävänsä akkuja sähköenergian varastointiin ja yksi kondensaattoreita. Yksi vastaaja kertoi keräävänsä tietoja akkujen kestosta Suomen olosuhteissa ja yksi kertoi kokeilevansa plug in –hybridibussia Göteborgissa.

Joukkoliikenteen tilaajat ehdottavat tukia hybridibussien yleistymiseksi

Tilaajien kyselyyn saatiin kolme vastausta: Bremen, Tukholma ja Lontoo. Bremenissä on kokeiltu hybridibusseja vuodesta 1998 alkaen ja liikenteessä on nyt 2 bussia. Tukholmassa hybridejä on ollut kokeilussa vuodesta 2009 alkaen ja Lontoossa vuodesta 2006 alkaen. Lontoossa on käytössä 240 hybridibussia ja suunnitelmissa on kasvattaa määrää tuhanteen bussiin vuoteen 2016 mennessä. Vastaajat näkivät hybridibussin hankinnan lisäkustannuksen dieseliin verrattuna vielä liian korkeana, jotta hybridejä voitaisiin edellyttää liikenteen kilpailutuksessa. Hybridejä voidaan kuitenkin suosia, erityisesti, jos niiden käyttöön saadaan kaupungilta, valtiolta tai EU:n kautta tukea. Esimerkiksi Britanniassa valtio on tukenut hybridibussien hankintaa Green Bus Fund -avustuksella. Hybridibussien tarjonta on myös joissain korityypeissä vielä vähäistä. Tilaajien mielestä hybridibussien käytössä tulisi seurata seuraavia asioita:

- ***polttoaineenkulutus***
- ***keskinopeus***
- ***luotettavuus (todellinen käyttö/suunniteltu käyttö)***
- ***tekniset viat***
- ***hankintahinta***
- ***huoltokustannukset***
- ***melutaso sisällä ja ulkona***
- ***lähipäästöt***

Palaute matkustajilta ja medialta on ollut pääosin positiivista, erityisesti melutason pieneneminen on nähty hyvänä asiana. Tilaajien mielestä hybridibusseista saadaan suurin hyöty tasaisessa maastossa paljon pysähdyksiä sisältävällä reitillä.

Operaattorit kannustavat polttoaineenkulutuksen seurantaan

Operaattorien kyselyyn saatiin vastaukset Rotterdamista, Gentistä, Bochumista, Neussista ja Oslosta, joissa on liikenteessä 4-20 hybridibussia. Hybridibussit on otettu kaikissa kaupungeissa käyttöön vuoden 2008 jälkeen. Vastaajista vain yksi ennakoi, että heillä on nykyistä enemmän hybridibusseja käytössään vuoteen 2016 mennessä. Operaattoreista kaksi käyttää sarjahybridejä ja kolme rinnakkaishybridejä. Saman valmistajan dieselbusseihin verrattuna operaattoreista kolmen mielestä hybridibusseissa on yhtä paljon teknisiä vikoja, yhden mielestä hieman vähemmän ja yhden mielestä hieman enemmän. Hybridibussien erityisiä ongelmia ovat olleet kondensaattoreiden eristys, matkustamon lisälämmityksen tarve sekä jarrutusenergian talteenoton optimointi. Vastaajista neljä huoltaa hybridibussit itse ja yhdellä on pitkäaikainen huoltosopimus valmistajan kanssa.

Kaksi vastaajaa ovat erittäin tyytyväisiä hybridibusseihin, kaksi melko tyytyväisiä ja yksi ei osannut sanoa puolesta eikä vastaan. Tyytyväisiä operaattorit ovat erityisesti polttoainesäästöihin, jotka ovat olleet 15-25 % dieselbusseihin verrattuna. Myös alhaisempi melutaso, tasaisempi kulku, pienemmät lähipäästöt ja imagon paraneminen ovat tyytyväisyyden lähteitä. Kaikki operaattorit voisivat ostaa lisää saman valmistajan hybridibusseja, mutta hybridien hinta koettiin edelleen liian korkeaksi. Bussien hankintaan on saatu tukea kaupungilta tai valtiolta, mutta kilpailutuksissa hybridibusseja ei ole toistaiseksi edellytetty tai suosittu.

Hybridibussien hyötyjen nähtiin olevan suurimmat paljon pysähdyksiä sisältävässä kaupunkikeskustan liikenteessä. Hyötyjen toteamiseksi operaattorit suosittelivat polttoaineenkulutuksen, sisä- ja ulkomelun, lähipäästöjen, luotettavuuden ja imagon seurantaa. Asiakastyytyväisyyttä on myös selvitetty ja tulokset ovat olleet positiivisia samoin kuin median suhtautuminen hybridibusseihin. Hybridibussin hyötyjen realisoinnissa kuljettajalla on merkittävä rooli ja kaikki operaattorit ovatkin kouluttaneet kuljettajiaan hybridibussin oikeaan ajotapaan. Erityisesti jarrutusenergian optimaalinen talteenotto vaatii kuljettajalta erilaista jarrutustapaa mihin dieselbusseissa on totuttu. Kiihdytykset pitäisi myös tehdä aiempaa rauhallisemmin, jotta se voidaan tehdä sähkömoottoria käyttäen.

4. Ajosyklin ja reitin vaikutuksen arvioiminen hybridibussien energiatehokkuuteen simuloinnin avulla

Osana Hybridi2 – Hybridibussien polttoaineenkulutuksen seurantatutkimus – projektia ajoneuvomallinnuksen ja -simuloinnin avulla selvitetään kaupunkibusseille tyypillisten ajosyklien ja reittien vaikutusta hybridibussien energiatehokkuuteen. Simuloinnin avulla tarkastellaan laskennallisesti hybridibussien potentiaalia energiatehokkuuden suhteen ja määritetään yleisellä tasolla ne ajosyklin/ajotavan ominaisuudet, joilla on vaikutusta bussin energiatehokkuuteen. Tutkimus koostuu kolmesta eri vaiheesta jotka ovat

1. ***Bussireittien mittaus ja mittatietojen käsittely***
2. ***Mitattujen tietojen ja reittien analysointi***
3. ***Ajosyklien simulointi ja energiatehokkuuden analysointi***

Kevääseen 2013 mennessä ensimmäiset kaksi vaihetta saatiin suoritettua. Kaupunkibussireittejä mitattiin Helsingissä, Tampereella ja Turussa. Kyseisillä reiteillä ajettiin diesel- ja hybridibusseilla joten vertailua energiatehokkuuden suhteen voidaan tehdä mitatuista ja simuloiduista tuloksista. Bussireittien mittaukset onnistuivat hyvin, tosin korkeustieto oli huomattavan epäluotettava etenkin keskikaupunkialueella. Tästä syystä koordinaattitietoja hyödyntämällä reittien korkeusprofiilit selvitettiin Maanmittauslaitoksen korkeuskarttojen avulla. Kokonaisuudessaan mitattujen tietojen käsittelyn lopputuloksena mitatuista reiteistä luotiin simulointiin soveltuvat ajosyklit.

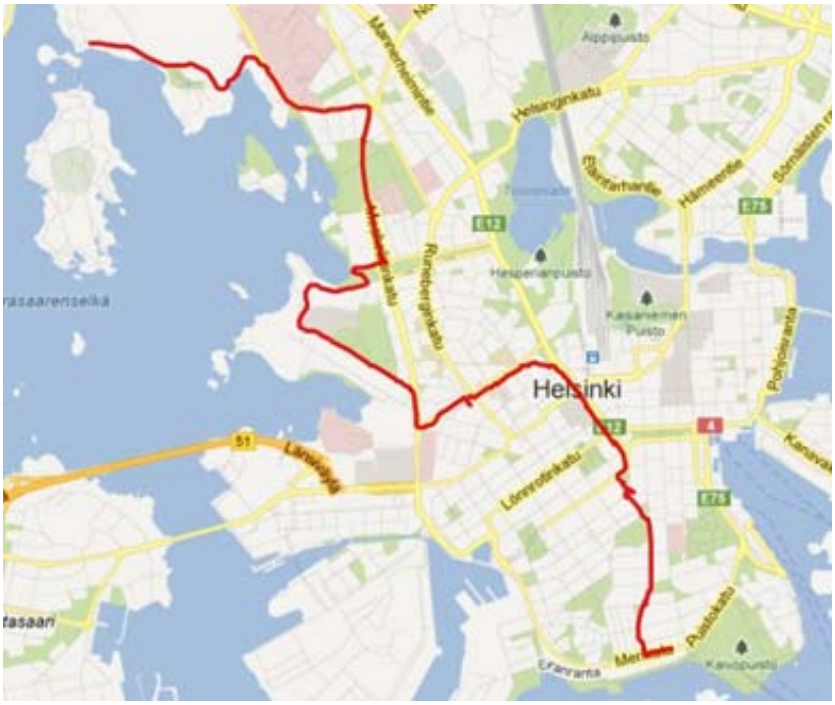
Hybridibussin energiatehokkuuteen vaikuttaa se, miten tehonjako polttomoottorin ja akuston välillä tapahtuu ja toisaalta myös se, miten ajosuorite toteutetaan eli minkälaista ajosykliä ajetaan. Koska tämän projektin puitteissa ei ollut mahdollista tietää kaupallisten hybridibussien tehonjaon periaatetta, simuloinneissa käytettiin aikaisemmissa tutkimuksissa hyväksi todettua tehonjaon periaatetta. Vaikka tämä tehonjako ei välttämättä vastaa olemassa olevien hybridibussien toimintaa, voidaan sen avulla kuitenkin arvioida hybridibussin energiatehokkuutta erilaisilla ajosykleillä ja ajosyklin vaikutusta energiatehokkuuteen.

4.1 Bussireittien mittaus ja mittausdatan käsittely

Reittien mittaukset suoritettiin kesän 2012 aikana henkilöautoon asennetulla VBOX-laitteistolla, jolla saatiin tallennettua ajonopeus, koordinaatit ja korkeustieto. Mittausten aikaan tallennettiin myös reitin bussipysäkkien koordinaatit, liikennevalojen koordinaatit sekä nopeusrajoitukset. Mittaukset suoritettiin kahteen suuntaan seuraavilla reiteillä:

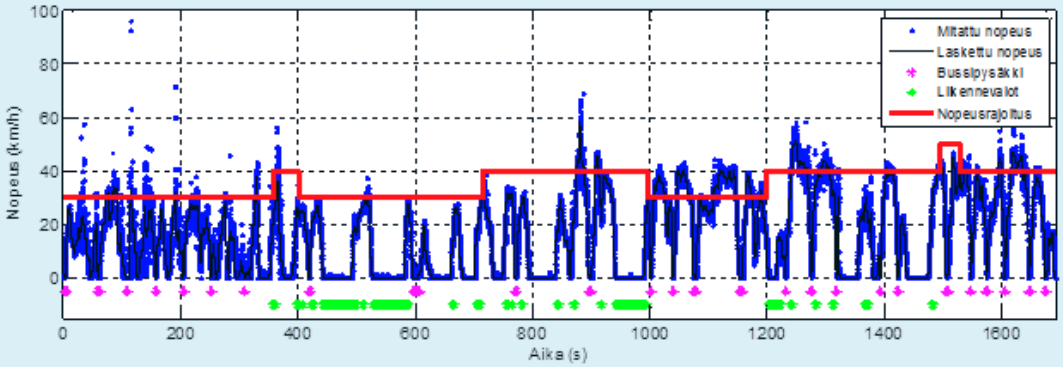
- ***Helsinki: 24 (Merikatu – Seurasaari)***
- ***Tampere: 25 (Tahmela - Janka), 29 (Rahola - Linnainmaa)***
- ***Turku: 3/30 (Majakkaranta – Kauppatori – Majakkaranta), 4/40 (Halinen – Amiraalistonkatu)***

Kuvassa 9 on esitetty Helsinki 24 (Merikatu - Seurasaari) reitti ajan suhteen. Mittauksissa tallennettu ajonopeus ei suoranaisesti vastaa liikennöivän bussin ajonopeutta joten sitä on käytetty ajetun matkan laskemiseen ja pohjana vertailuajosyklille. Kuvassa 10 sama reitti on esitetty matkan suhteen sisältäen myös mitatun ja lasketun tien korkeuden. Kuten kuvasta huomataan, mitatussa korkeustiedossa on merkittävää hajontaa keskikaupunkialueella ja pysähdyksissä ollessa. Laskettu korkeus perustuu epärealististen mittauspisteiden eliminointiin ja mitatun tiedon suodattamiseen. Tästäkin huolimatta huomattiin ettei laskettu korkeustieto ole riittävän luotettava ja tarkka simuloinnin vaatimuksiin.

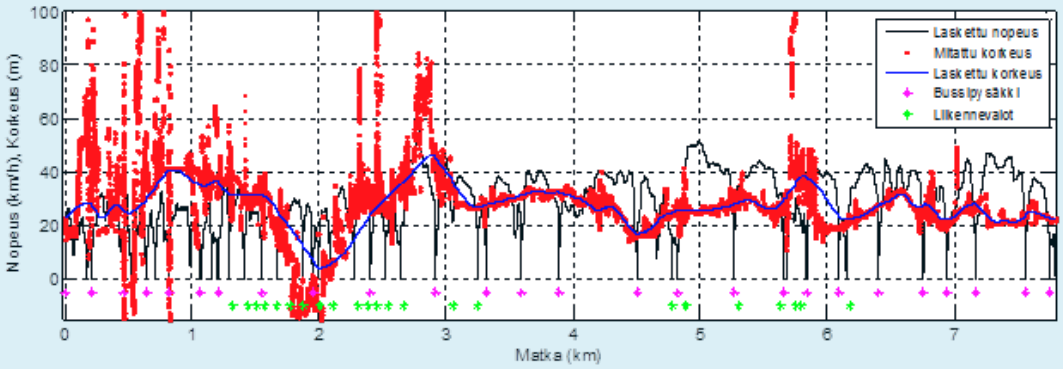


Kuva 8. Helsingin bussireitti 24 mitatut koordinaatit esitettynä kartalla.

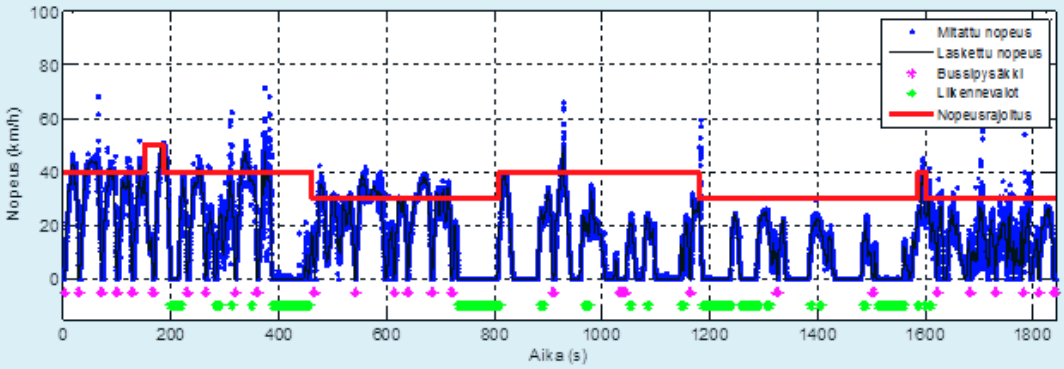
Mittaustiedot Helsingin bussireitiltä



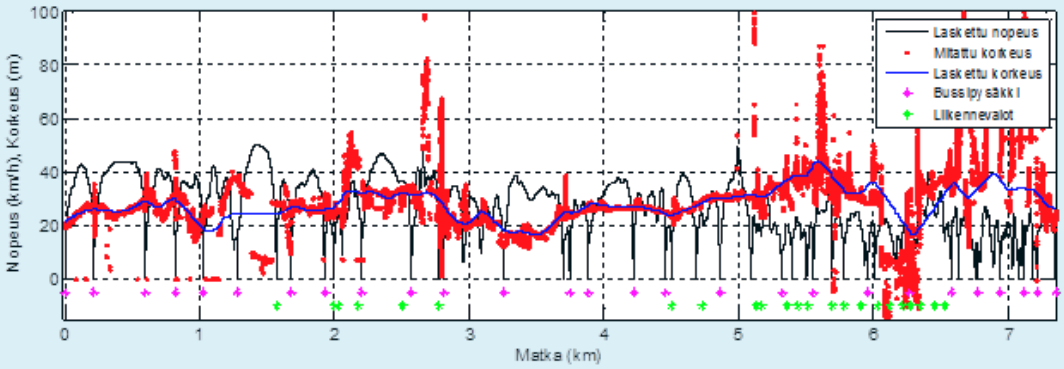
Kuva 9. Helsinki 24 (Merikatu - Seurasaari) reitti ajan suhteen



Kuva 10. Helsinki 24 (Merikatu - Seurasaari) reitti matkan suhteen.

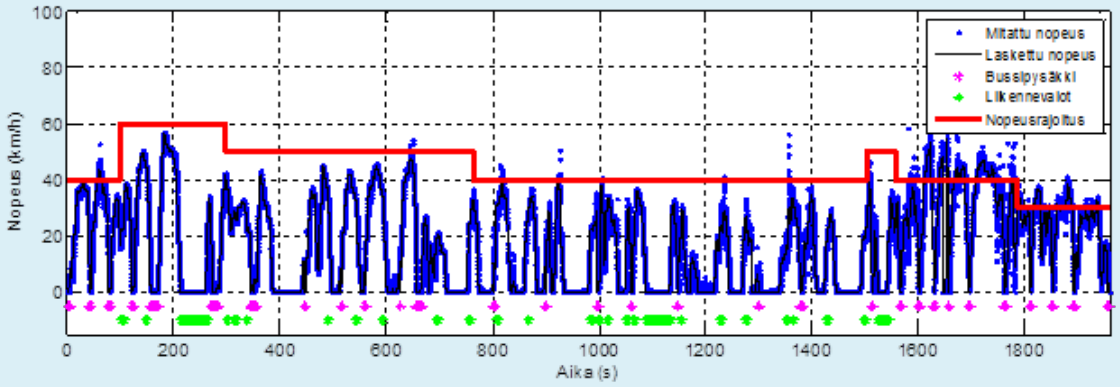


Kuva 11. Helsinki 24 (Seurasaari - Merikatu) reitti ajan suhteen.

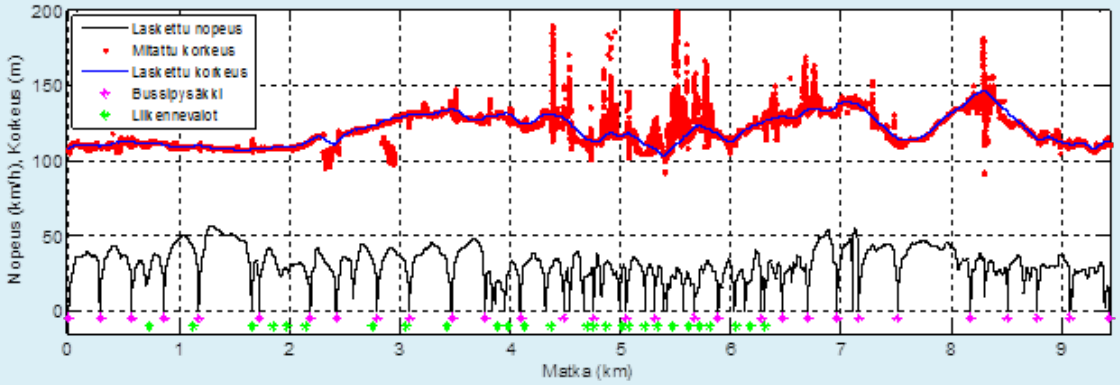


Kuva 12. Helsinki 24 (Seurasaari - Merikatu) reitti matkan suhteen.

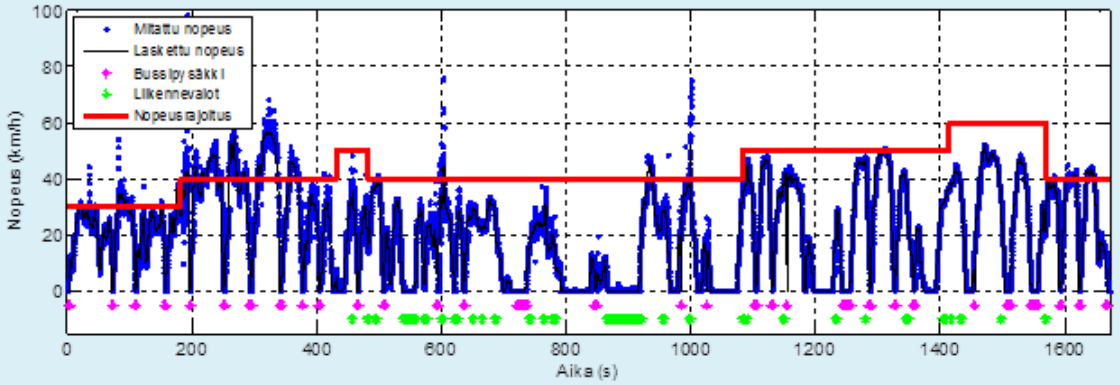
Mittaustiedot Tampereen bussireitiltä



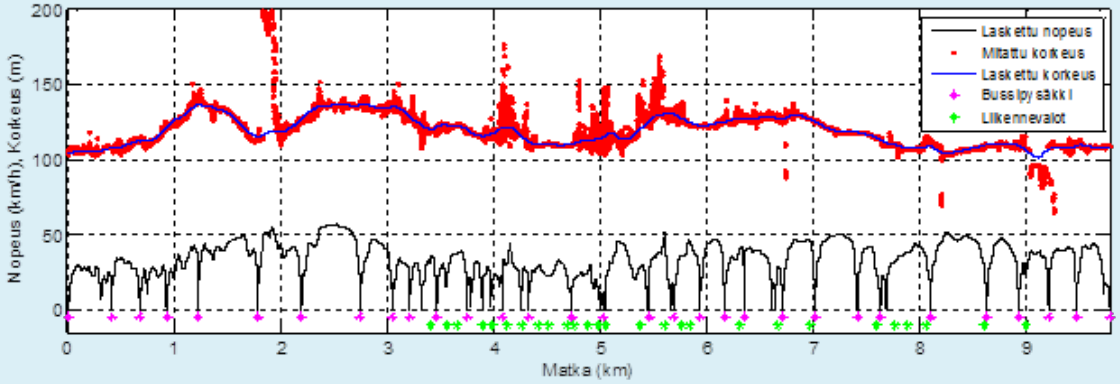
Kuva 13. Tampere 25 (Janka - Tahmela) reitti ajan suhteen.



Kuva 14. Tampere 25 (Janka - Tahmela) reitti matkan suhteen. Kuvista 14 ja 16 voidaan huomata että mitatussa korkeustiedossa on huomattavan paljon vähemmän hajontaa kuin Helsingin reitillä.

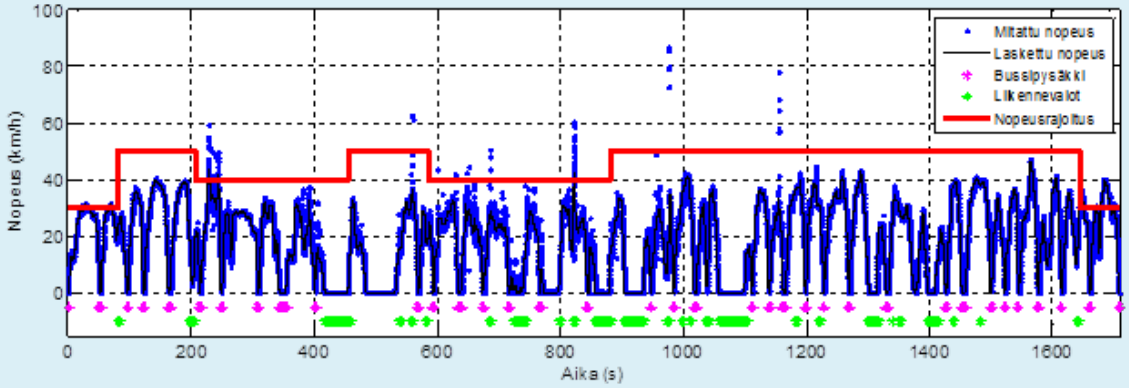


Kuva 15. Tampere 25 (Tahmela - Janka) reitti ajan suhteen.

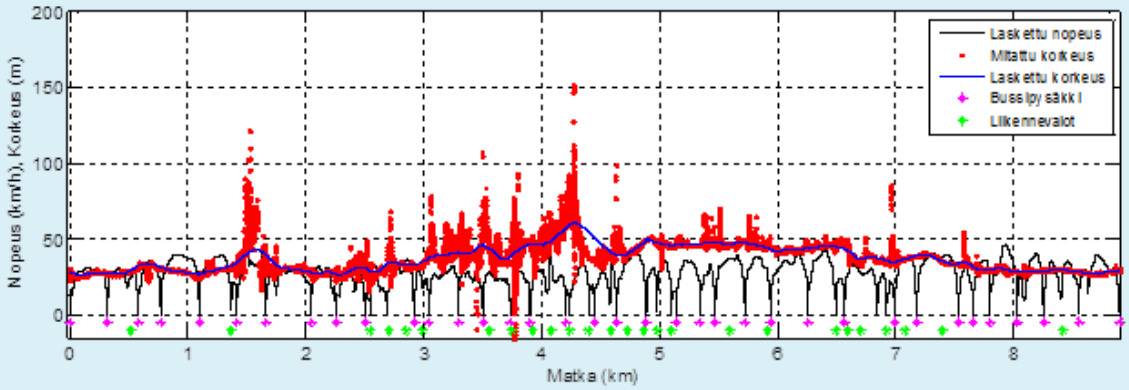


Kuva 16. Tampere 25 (Tahmela - Janka) reitti matkan suhteen.

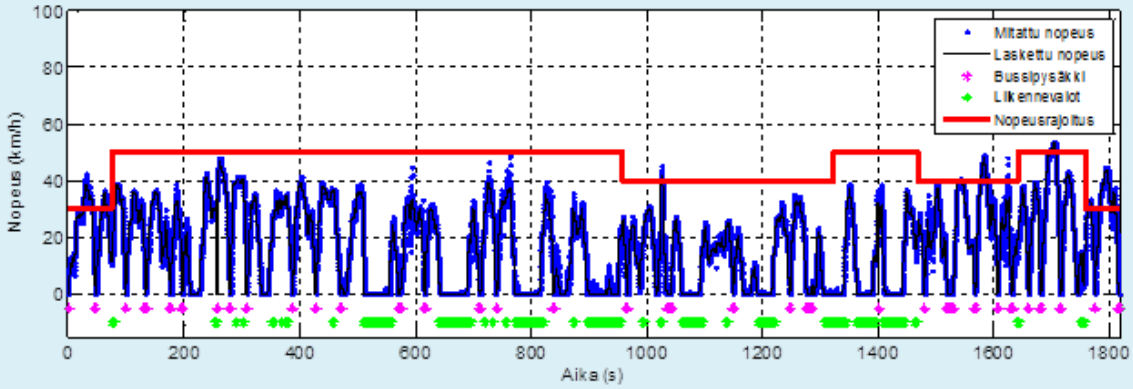
Mittaustiedot Turun bussireitiltä



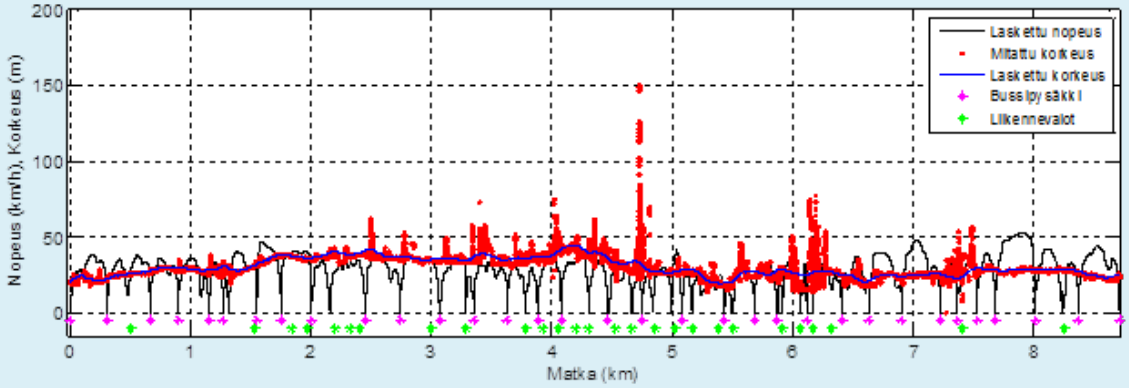
Kuva 17. Turku 3 (Majakkaranta – Kauppatori – Majakkaranta) reitti ajan suhteen.



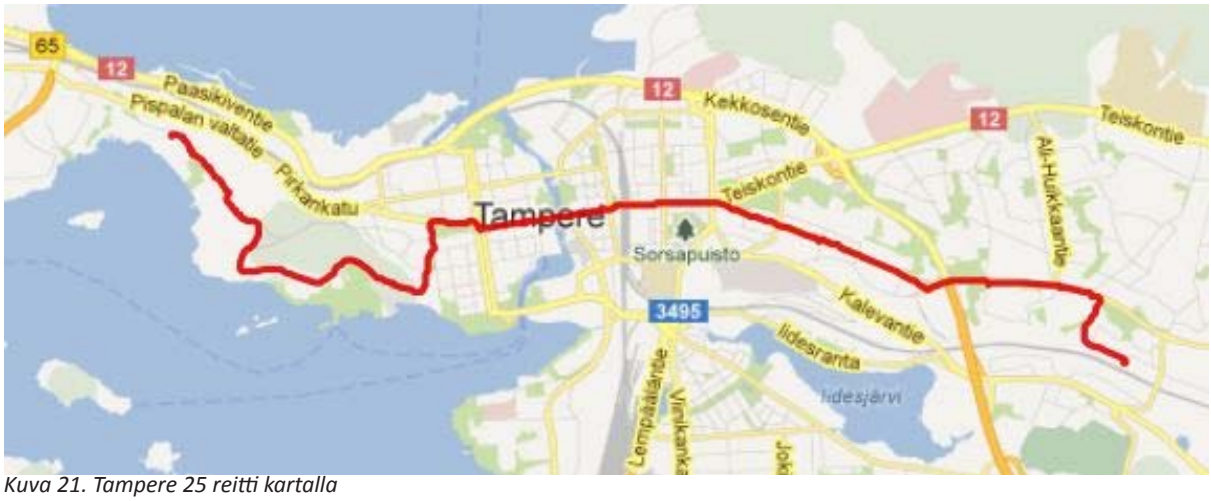
Kuva 18. Turku 3 (Majakkaranta – Kauppatori – Majakkaranta) reitti matkan suhteen.



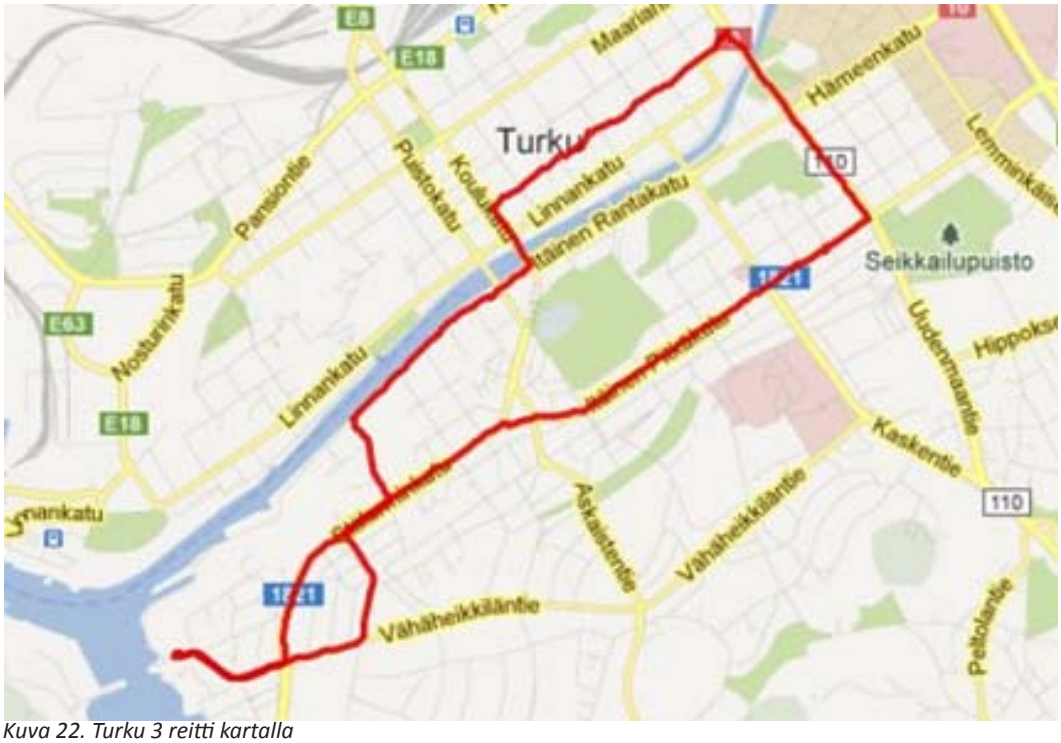
Kuva 19. Turku 30 (Majakkaranta – Kauppatori – Majakkaranta) reitti ajan suhteen.



Kuva 20. Turku 30 (Majakkaranta – Kauppatori – Majakkaranta) reitti matkan suhteen.



Kuva 21. Tampere 25 reitti kartalla



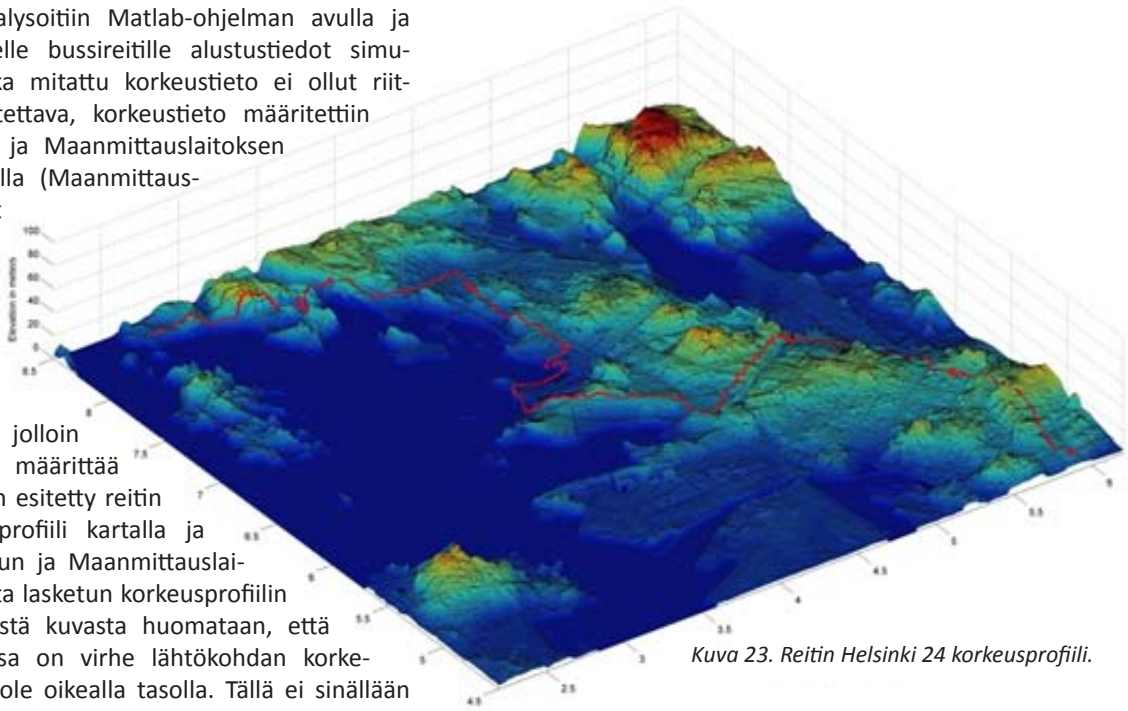
Kuva 22. Turku 3 reitti kartalla

Taulukko 1. Yhteenveto mitatuista bussireiteistä.

Lyhenne	Kaupunki	Reitti	Matka (km)	Bussipysäkit	Liikennevalot
HE24A	Helsinki	Merikatu – Seurasaari	7.8	26	23
HE24B	Helsinki	Seurasaari – Merikatu	7.3	27	23
TA25A	Tampere	Janka – Tahmela	9.4	30	27
TA25B	Tampere	Tahmela - Janka	9.8	31	27
TU03	Turku	Majakkaranta – Kauppatori – Majakkaranta	8.9	36	26
TU30	Turku	Majakkaranta – Kauppatori – Majakkaranta	8.7	33	27

4.2 Mitattujen tietojen ja reittien analyysi

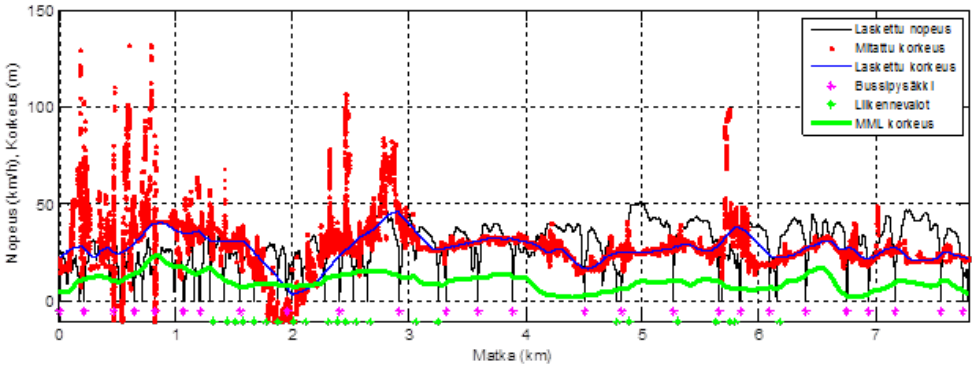
Mitattuja tietoja analysoitiin Matlab-ohjelman avulla ja niistä luotiin jokaiselle bussireitille alustustiedot simulointeja varten. Koska mitattu korkeustieto ei ollut riittävän tarkka ja luotettava, korkeustieto määritettiin reitin koordinaattien ja Maanmittauslaitoksen korkeuskarttojen avulla (Maanmittauslaitos 2013). Kyseiset korkeuskartat on määritetty tasokoordinaatistossa, joten reitin maantieteelliset koordinaatit muunnettiin tasokoordinaatistoon, jolloin korkeustieto voitiin määrittää reitille. Kuvassa 23 on esitetty reitin Helsinki 24 korkeusprofiili kartalla ja kuvassa 24 on mitatun ja Maanmittauslaitoksen korkeuskartasta lasketun korkeusprofiilin vertailu. Jälkimmäisestä kuvasta huomataan, että mitatussa korkeudessa on virhe lähtökohdan korkeudessa, jolloin se ei ole oikealla tasolla. Tällä ei sinällään olisi merkitystä simulointiin, koska pelkästään suhteellinen korkeusero on merkitsevää eikä se millä tasolla ollaan suhteessa meren pintaan.



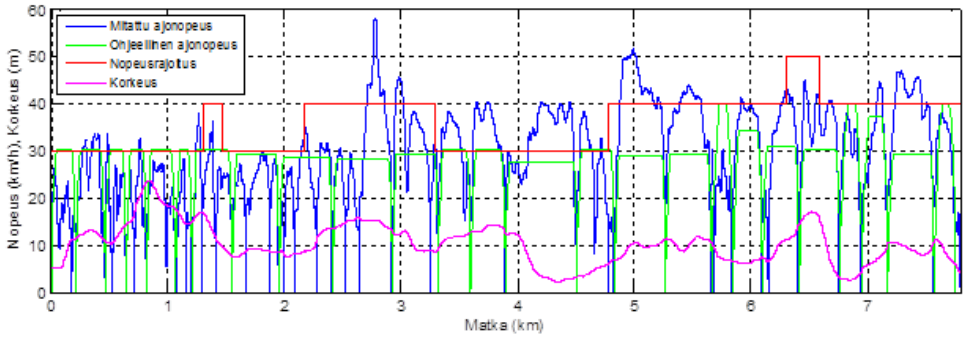
Kuva 23. Reitin Helsinki 24 korkeusprofiili.

Mitattujen reittien aikataulutiedot saatiin haettua eri kaupunkien bussien reittiopasjärjestelmistä (Reittiopas 2013, Brahe matkainfo 2013, Repa Reittiopas 2013). Näistä järjestelmistä jokaiselle reitille haettiin liikennöintiaikataulu ja bussipysäkkien nimet. Aikataulutietojen avulla pystyttiin määrittämään operoinnin keskinopeus reitillä ja viitteelliset ajoajat pysäkkien välille. Simulointeja varten jokaiselle bussipysäkkien väliselle matkalle laskettiin tai määritettiin seuraavat alustustiedot: Aika (s), Matka (m), Ohjeellinen ajonopeus (km/h), Suhteellinen korkeusero (m), Korkeusprofiili matkan funktiona (%), Nopeusrajoitus (km/h) ja Keskinopeus (km/h).

Bussipysäkkien välinen aika määritettiin alustavasti ohjeellisen ajonopeuden mukaan. Tämä ajonopeus koostui 1 m/s2 kiihdytyksestä ja jarrutuksesta. Kyseinen ajonopeus on ohjeellinen, koska se ei vastaa todellista ajotapahtumaa, vaan sen avulla voidaan määrittää simulointia varten parametreja, jotka selvitetään seuraavassa kappaleessa. Kuvassa 25 on esitetty Helsinki 24 reitille mitattu ja ohjeellinen ajonopeus jotka vastaavat toisiaan matkan ja ajan suhteen.



Kuva 24. Mitattu ja laskettu korkeusprofiili reitille Helsinki 24.



Kuva 25. Mitattu ja ohjeellinen ajonopeus reitillä Helsinki 24.

4.3 Ajosyklin vaikutuksen arviointi

Energiaoptimaalinen ajosykli

Diesel- ja sähköbusseille energiaoptimaalinen ajosykli voidaan luoda optimoimalla ajonopeus voimansiirron ja energialähteen hyötysuhteiden avulla. Hybridibusseille myös kahden erillisen energialähteen toimintapisteet voidaan optimoida ja energiavaraston energiatase täytyy säilyttää pitkällä aikavälillä. Kaupunkibussin tapauksessa simulointi suoritetaan matkan suhteen, koska ajetaan ennalta määritettyjä pysäkkien välisiä matkoja. Tämän projektin puitteissa kehitettiin simulointimenetelmä jonka avulla voidaan määrittää energiaoptimaalinen ajosykli diesel- ja sähköbusseille (Lajunen 2013). Menetelmän pohjana on matemaattinen optimointialgoritmi, joka perustuu dynaamiseen ohjelmointiin (Sundström & Guzella 2009). Kyseinen ohjelmointimenetelmä soveltuu hyvin kaupunkibussien ajosyklien optimointiin, koska ajosyklistä tiedetään ajettava matka ja tavoite aika. Toisaalta menetelmä vaatii paljon laskentatehoa ja monimuuttujaoptimointiongelmissa kuten hybridibussin tapauksessa optimointiongelma muodostuu helposti niin laajaksi, ettei sitä voi enää ratkaista perinteisellä tutkimuskäyttöön tarkoitetulla tietokoneella. Toisaalta myöskään energiavaraston energiatasetta ei voida tietää etukäteen ajosyklille. Näistä syistä menetelmää ei voitu käyttää samalla tavalla kuin diesel- ja sähköbusseille. Tämän sijaan määritettiin vertailuajosykli pohjautuen mitattuun ajonopeuteen reitillä ja energiaoptimaalinen ajosykli voimansiirrolle optimointimenetelmän avulla. Simulointeja suoritettiin diesel- ja rinnakkaishybridibussin malleilla kummallakin ajosyklillä. Tällä tavoin voidaan arvioida ajosyklin vaikutusta hybridibussin energiankulutukseen ja vertailla hybridibussin energiatehokkuutta dieselbussiin.

Optimointiongelma dieselbussille

Energiaoptimaalinen ajosykli voidaan määrittää dieselbussille käyttämällä optimointialgoritmia, jossa aika (x_k) on tilamuuttuja

$$x_{k+1} = f(x_k, w_k) + x_k, \qquad (1)$$

ja w_k on virtuaalinen ohjausparametri jonka avulla määritetään ajonopeus (vk) seuraavasti

$$v_k = w_k(v_{max} - v_{min}) + v_{min}, \qquad (2)$$

jossa v_{min} on minimi ajonopeus ja v_{max} on maksimi ajonopeus (nopeusrajoitus). Polttoaineenkulutus voidaan minimoida seuraavalla kustannusfunktiolla

$$J = \sum_{k=0}^{N-1} P_{fuel}(w_k, k) \cdot T_d(w_k, k), \qquad (3)$$

jossa P_{fuel} on polttoaineesta saatava teho ja T_d on yhden matka-askeleen aikana kulunut aika. Kustannusfunktio voidaan myös kirjoittaa matka-diskreettiseksi minimointiongelmaksi

$$\min_{w_k \in W_k} \sum_{k=0}^{N-1} P_{fuel}(w_k, k) \cdot T_d(w_k, k). \qquad (4)$$

Matka-askel on muuttuva, jolloin voidaan ottaa paremmin huomioon dynaamiset muutokset alhaisilla ajonopeuksilla.

Simulointimallit ja –parametrit

Ajosyklit simuloitiin aikaisemmin luoduilla dieselbussin ja rinnakkaishybridibussin malleilla (Lajunen 2012). Kyseiset simulointimallit parametrisoitiin siten, että niiden suorituskyky vastaa markkinoilla olevia diesel- ja hybridibusseja. Taulukoissa 2 ja 3 on esitetty simulointimallien tärkeimmät parametrit. Dieselbussin moottorin maksimiteho on 202 kW.

Taulukko 2. Yleiset parametrit.

Parametri	Arvo
Kokonaismassa (kg)	12000
Otsapinta-ala (m^2)	6.2
Ilmanvastuskerroin	0.6
Vierimisvastuskerroin	0.01
Akseliväli (m)	6.5
Renkaan säde (m)	0.41
Perävälitys	4.88
Alennusvaihde	1.5

Taulukko 3. Hybridibussin parametrit.

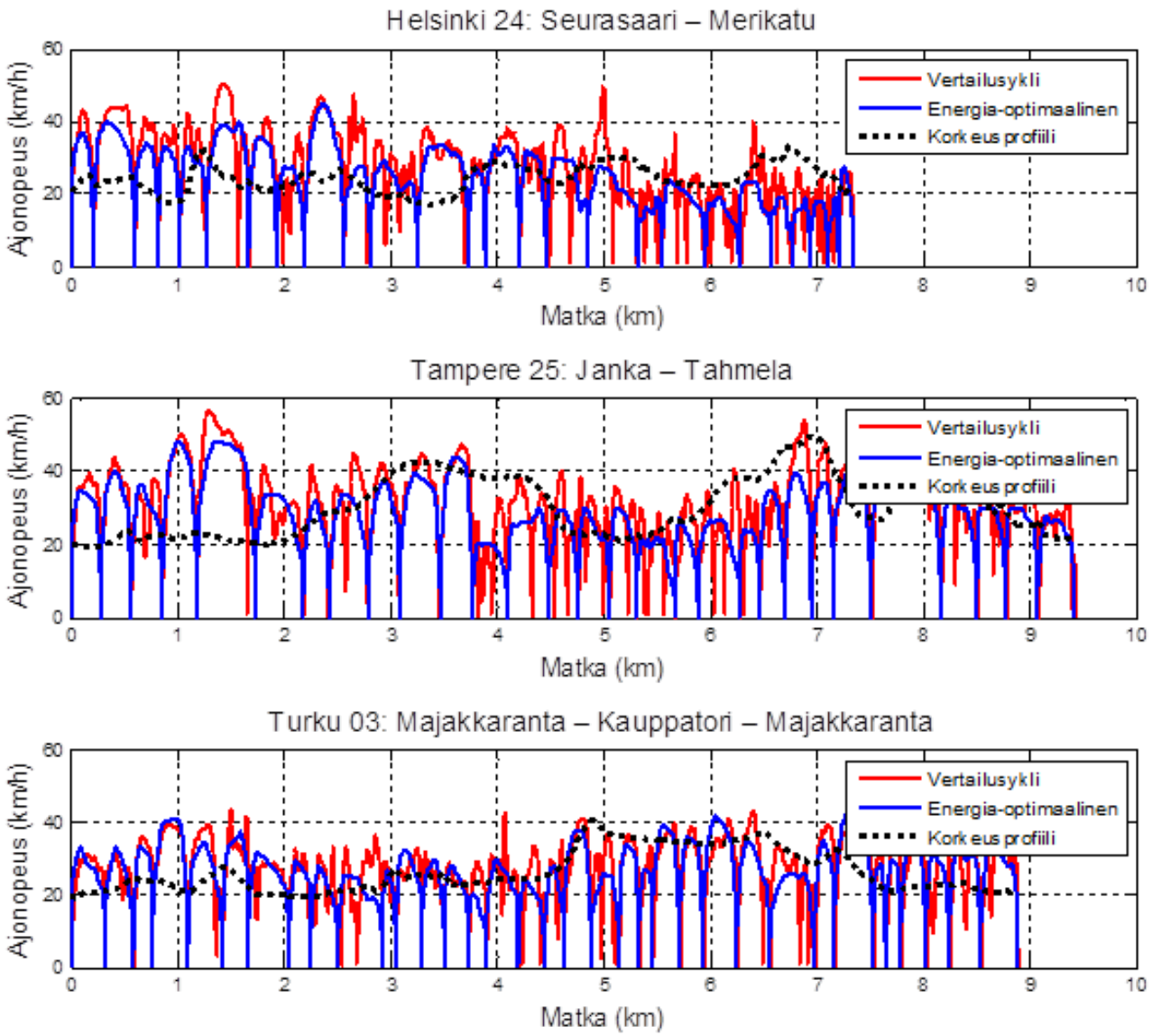
Parametri	Arvo
Sähkömoottorin max. vääntömomentti (Nm)	550
Sähkömoottorin max. teho (kW)	100
Polttomoottorin max. teho (kW)	160
Akuston jännite (V)	518
Akuston kapasiteetti (kWh)	6.2
Akuston max. teho (kW)	117
Keskimääräinen apulaiteteho (kW)	6.0

Hybridibussin energianhallintastrategia perustuu kohtalaisen yksinkertaiseen mutta luotettavaan sääntöpohjaiseen logiikkaan, jossa akuston varaustila pidetään koko ajan kohtalaisen korkealla tasolla (Lajunen 2012).

Seuraaville kolmelle bussireitille luotiin vertailuajosykli sekä sähköiselle voimalinjalle energia- optimaalinen ajosykli (kuva 26):

- **Helsinki 24: Seurasaari – Merikatu**
- **Tampere 25: Janka – Tahmela**
- **Turku 3: Majakkaranta – Kauppatori – Majakkaranta**

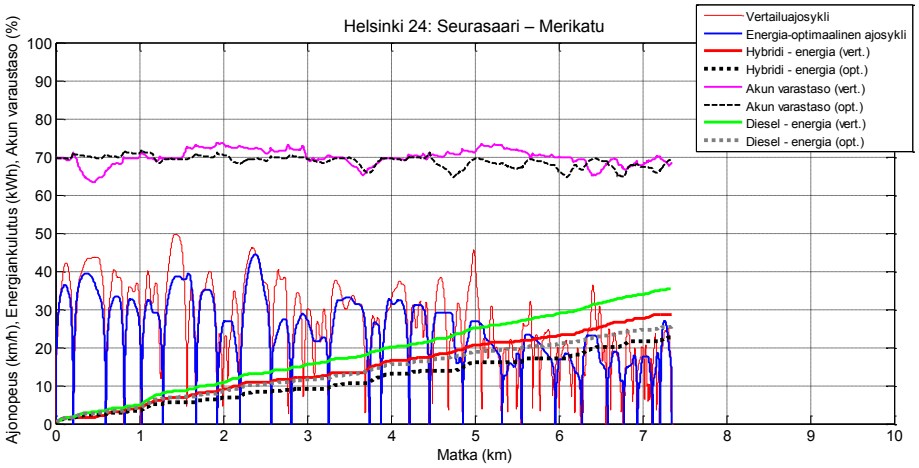
Koska vertailuajosykli on luotu henkilöautolla mitatun nopeuden pohjalta, se vastaa kohtuullisen aggressiivista kaupunkibussilla ajoa.



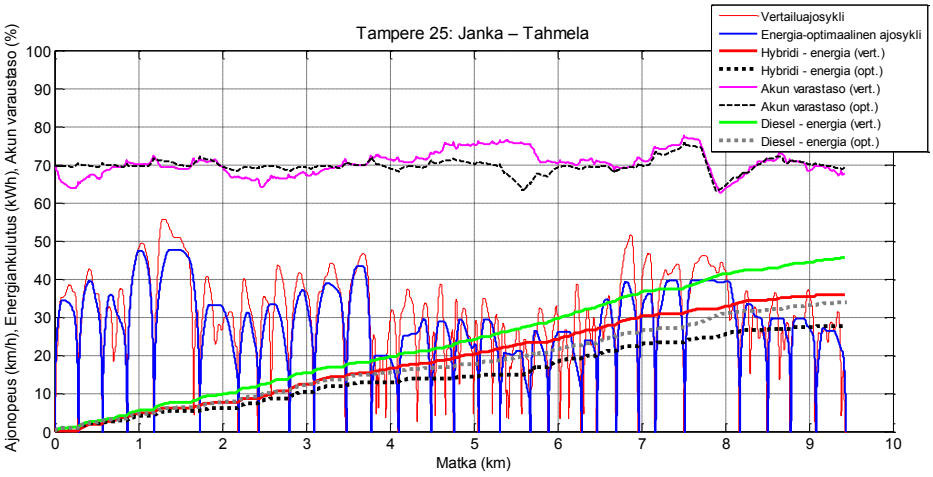
Kuva 26. Ajosyklit ja korkeusprofiili matkan suhteen.

4.4 Simulointitulokset

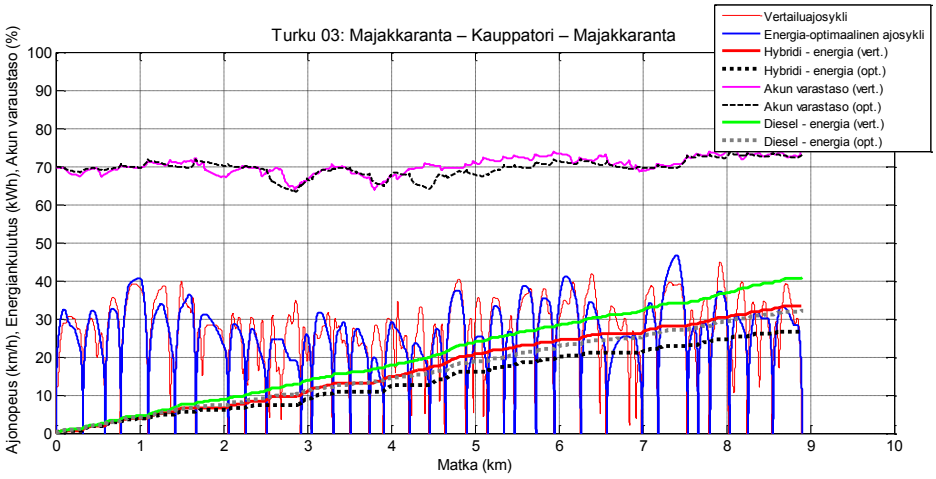
Vertailuajosykli ja energia-optimaalinen ajosykli simuloitiin sekä dieselbussin että rinnakkaishybridibussin malleilla. Tällä tavoin hybridibussiin simulointituloksille saatiin myös hyvä vertailukohde. Kuvissa 27–29 on esitetty hybridibussin simulointitulokset kummallekin ajosyklille. Kuvissa on vertailun vuoksi esitetty myös dieselbussin polttoaine-energiankulutus. Kaikista kolmessa eri reitissä polttoaine-energiankulutuksen ero kasvaa tasaisesti matkan aikana vertailuajosyklin ja optimaalisen ajosyklin välillä. Huomion arvoista on energiavaraston eli akuston käyttö kahden eri ajosyklin välillä. Kaikissa hybridibussin simuloinneissa käytettiin samaa energianhallintalogiikkaa joten erot akuston käytössä johtuvat suoraan ajotavasta eli ajosyklin muodosta. Näiden tulosten pohjalta nähdään selkeästi kuinka ajotapa vaikuttaa hybridijärjestelmän toimintaan joko heikentäen tai vastaavasti parantaen energiataloutta



Kuva 27. Kumulatiivinen polttoaine-energiankulutus Helsingin syklillä.



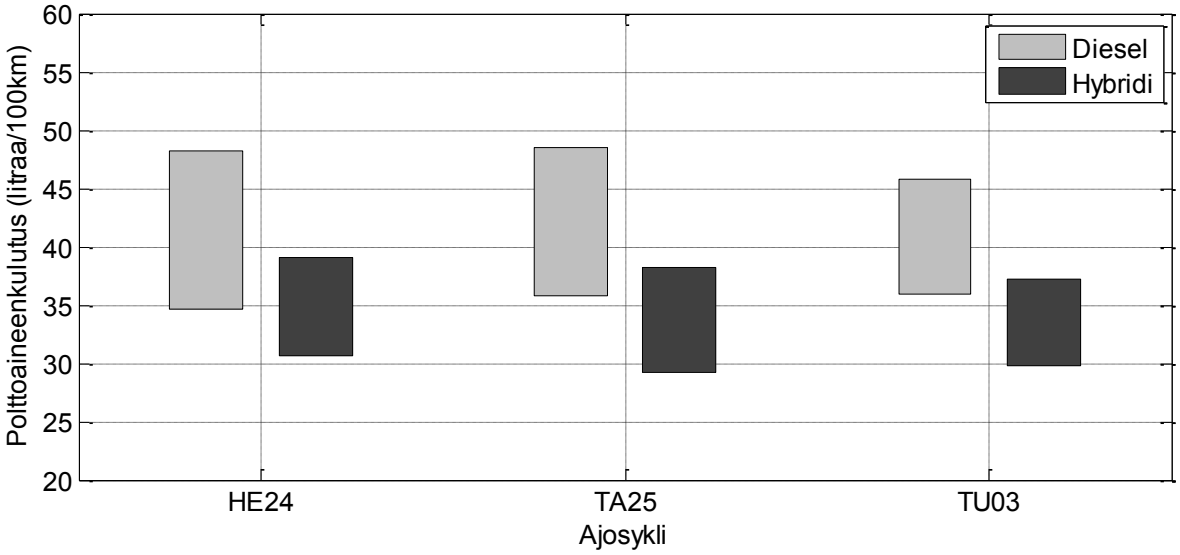
Kuva 28. Kumulatiivinen polttoaine-energiankulutus Tampereen syklillä.



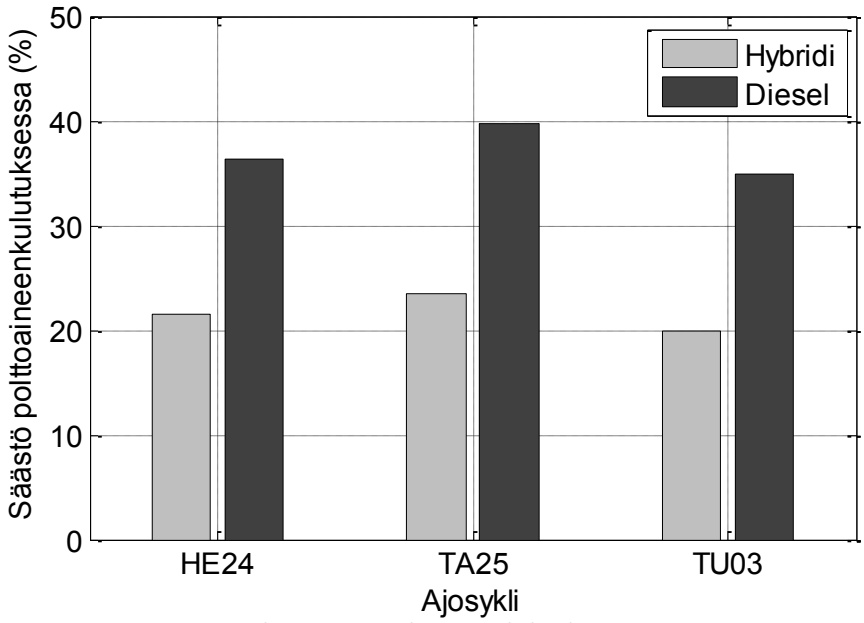
Kuva 29. Kumulatiivinen polttoaine-energiankulutus Turun syklillä.

Kuvassa 30 on esitetty polttoaineenkulutuksen mahdollinen vaihteluväli eri ajosykleillä diesel- ja hybridibussille. Näiden tulosten perusteella ajotapa vaikuttaa enemmän dieselbussin polttoaineenkulutukseen. On myös syytä huomata, että hybridibussin polttoaineenkulutus voi olla jopa suurempi kuin dieselbussilla kun verrataan energia-optimaalista dieselbussilla ajoa vertailuajosyklin tuloksiin hybridibussilla.

Kuvassa 31 on esitetty potentiaalinen säästö polttoaineenkulutuksessa, jos kyseiset ajosyklit ajettaisiin energia-optimaalisesti suhteessa vertailuajosyklillä ajamiseen hybridi- tai dieselbussilla. Näistä tuloksista huomataan että jopa 40 % parannus polttoaineenkulutuksessa on mahdollista, jos verrataan energiatehottomaan ajoon dieselbussilla. Toisaalta, hybridibussin simulointituloksissa on eroa noin 20 %, joka vaikuttaa kohtuullisen suurelta. Tässä kohtaa täytyy kuitenkin muistaa, että vertailukohtana on aggressiivinen ajaminen, joka edustaa käytännössä huonointa mahdollista ajotapaa. On myös mahdollista, ettei vertailusyklin ajotapa sovi hyvin yhteen hybridibussin energianhallinnan logiikan kanssa, jolloin potentiaalinen hybridijärjestelmän hyöty jää käyttämättä.

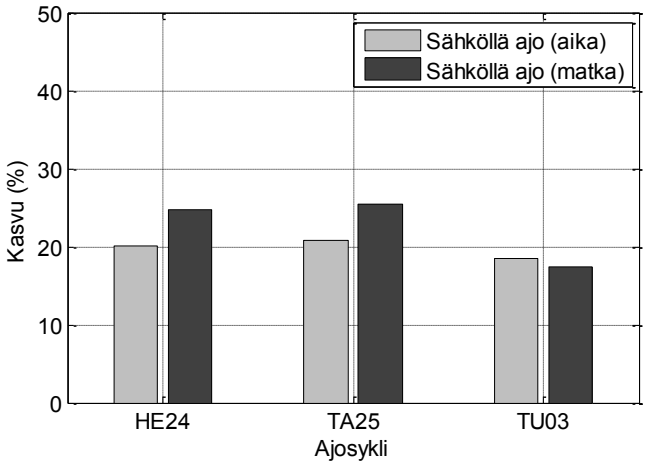


Kuva 30. Polttoaineenkulutuksen vaihtelu eri ajosykleillä.



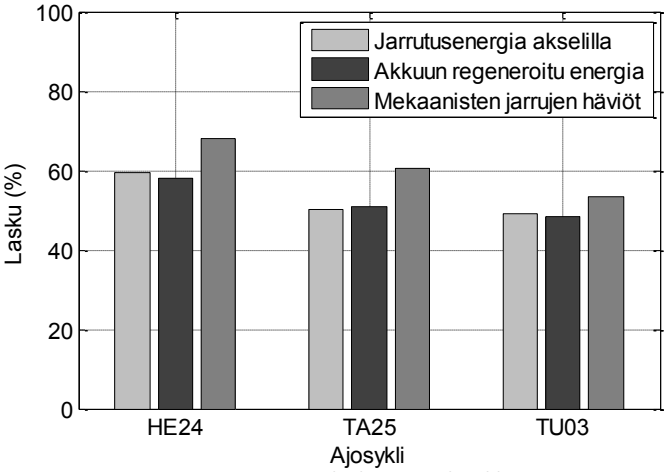
Kuva 31. Potentiaalinen säästö polttoaineenkulutuksessa.

Simulointitulokset osoittavat myös, että energiatehokkaalla ajotyylillä voidaan polttoaineenkulutuksen alenemisen lisäksi lisätä pelkällä sähköllä ajon määrää. Kuvassa 32 on kuvattu sähköllä ajon osuuden kasvu eri reiteillä. Kyseistä kasvua voidaan pitää merkittävä kun se on sekä ajassa että matkassa mitattuna noin 20 % tasolla. Tämä voi myös omalta osaltaan parantaa hybridijärjestelmän energiatehokkuutta.



Kuva 32. Sähköllä ajon osuuden kasvu vertailusyklin ja optimaalisen syklin välillä.

Koska hybridibussilla on mahdollista regeneroida jarrutusenergiaa akustoon, voidaan olettaa että tällä on positiivisia vaikutuksia kokonaisenergiankulutukseen. Simulointituloksien pohjalta arvioitiin jarrutusenergiaan liittyviä eroja vertailu- ja energia-optimaalisen ajosyklin välillä. Kuvassa 33 esitetään muutos, jos ajetaan energia-optimaalisesti suhteessa vertailuajosykliin. Jarrutusenergian määrä laskee 50–60 % ja samalla luonnollisesti myös akustoon regeneroitu energian määrä laskee merkittävästi. Vielä oleellisempaa on mekaanisten jarrujen häviöt jotka laskevat myös noin 60 %. Merkittävin tekijä jarrutusenergian vähenemiseen on nopeiden jarrutuksien välttäminen, joka puolestaan vaatii ennakointia ja ajoreitin hyvää tuntemusta. Tässä tapauksessa myös ns. ylimääräiset jarrutukset vertailuajosyklissä lisäävät jarrutusenergian määrää.



Kuva 33. Jarrutusenergian lasku vertailusyklin ja optimaalisen syklin välillä.

Ajosyklien ja bussireittien simulointitulokset osoittivat selkeästi, että ajosyklillä tai ajotavalla on merkittävä vaikutus kaupunkihybridibussin energiankulutukseen. Simulointituloksien pohjalta voidaan päätellä, että ajon ja reitin ennakointi, sekä nopeiden ja turhien jarrutusten välttäminen vähentää merkittävästi polttoaineenkulutusta. Etenkin hybridibussilla ajettaessa ennakoinnilla on merkittävä vaikutus, koska ajotavan sopivuudella suhteessa hybridijärjestelmän energianhallintalogiikkaan on huomattava vaikutus järjestelmän kokonaisenergiatehokkuuteen. Selkeitä tapauksia tästä on jarrutustapahtuman ennakointi ja korkeuserojen huomioon ottaminen. Simulointitulokset osoittivat myös, ettei suuren jarrutusenergiamäärän regenerointi ole välttämättä kokonaisuudessaan energiatehokasta.

5. Polttoaineenkulutuksen seuranta

Hybridibussien todellisen polttoaineenkulutuksen ja polttoainesäästön dieseliin verrattuna selvittämiseksi varustettiin kaksi hybridibussia ja samalla linjalla liikennöivät dieselbussit polttoaineenkulutuksen seurantajärjestelmillä Turussa, Tampereella ja Helsingissä. Helsingissä käytettiin Helsingin bussiliikenteen omaa seurantajärjestelmää. Turussa ja Tampereella busseihin asennettiin EC-Tools Oy:n toimittama Driveco-järjestelmä.

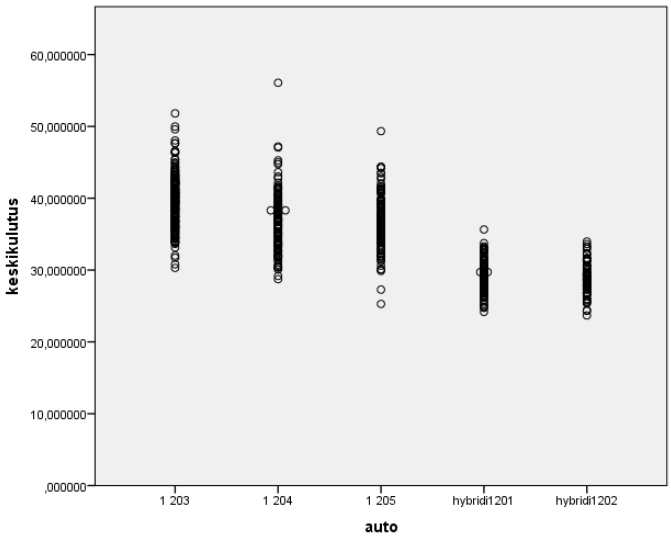
5.1 Helsinki

Helsingissä on käytössä sekä diesel- että hybridibusseissa oma polttoaineenkulutuksen seurantajärjestelmä, jossa käytetään TechnoSmartin ajoneuvolaitteita ja CGI:n ohjelmistoa. Tutkimusta varten kaksi Volvon hybridibussia ja kolme samaa vuosimallia olevaa Scanian EEV-päästöluokan dieselbussia siirrettiin linjalle 42 kesän 2012 ajaksi. Polttoaineenkulutustietoa saatiin kesäkuun puolivälistä elokuun puoliväliin kuukausikohtaisena summatietona auto- ja kuljettajakohtaisesti ajosuunnittain. Seurantajakson aikana 323 kuljettajaa ajoi viidellä bussilla yhteensä noin 70 000 km ja polttoainetta kului noin 25 000 litraa. Taulukossa 4 on esitetty autokohtaiset polttoaineenkulutuksen tunnusluvut seurantajakson ajalta.

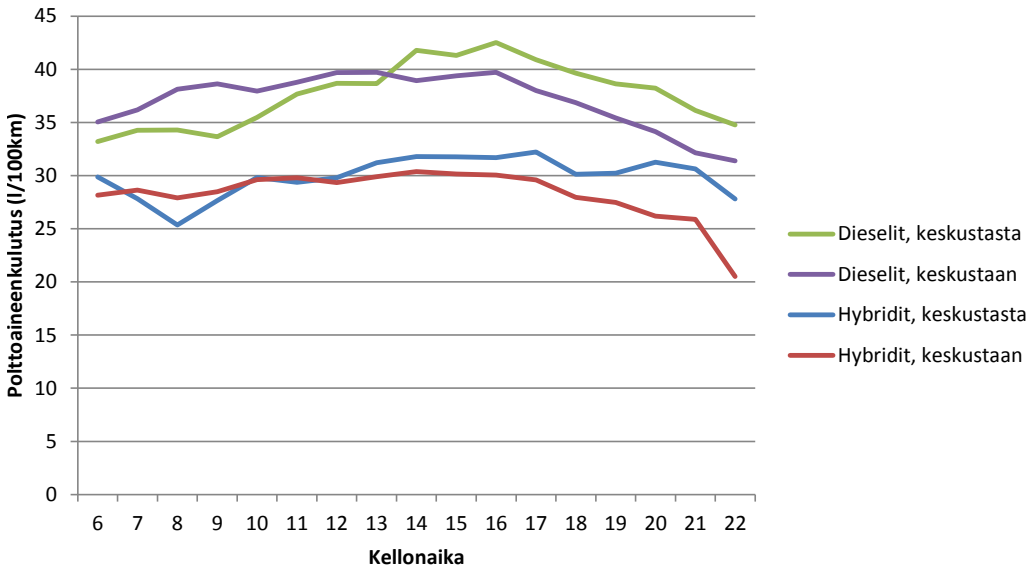
Taulukko 4. Autokohtainen polttoaineenkulutus

Polttoaineen kulutus l/100km	EEV 1203	EEV 1204	EEV 1205	Hybridi 1201	Hybridi 1202
keskiarvo	38,7	35,9	36,2	29,3	29,1
keskihajonta	3,1	2,8	2,0	1,6	1,5
minimi	32,3	28,2	32,6	27,3	25,6
maksimi	43,3	39,0	38,7	32,6	31,4

Hybridibussien polttoaineenkulutus on siis 18–25 % pienempi kuin dieselbussien. Hybridibussien kulutuksen hajonta on pienempi kuin dieselbussien, eli liikennetilanne ja kuljettajan ajotapa vaikuttavat hybridibussien kulutukseen vähemmän kuin dieselbussien kulutukseen. Tämä näkyy pienempänä kulutuksen vaihteluna päivän aikana (kuva 35) ja kuljettajien välillä (kuva 34).



Kuva 34. Kuljettajien keskikulutukset vertailubusseilla seurantajakson aikana.



Kuva 35. Polttoaineenkulutuksen vuorokausivaihtelu lähtöajan mukaan ajosuunnittain.

5.2 Tampere

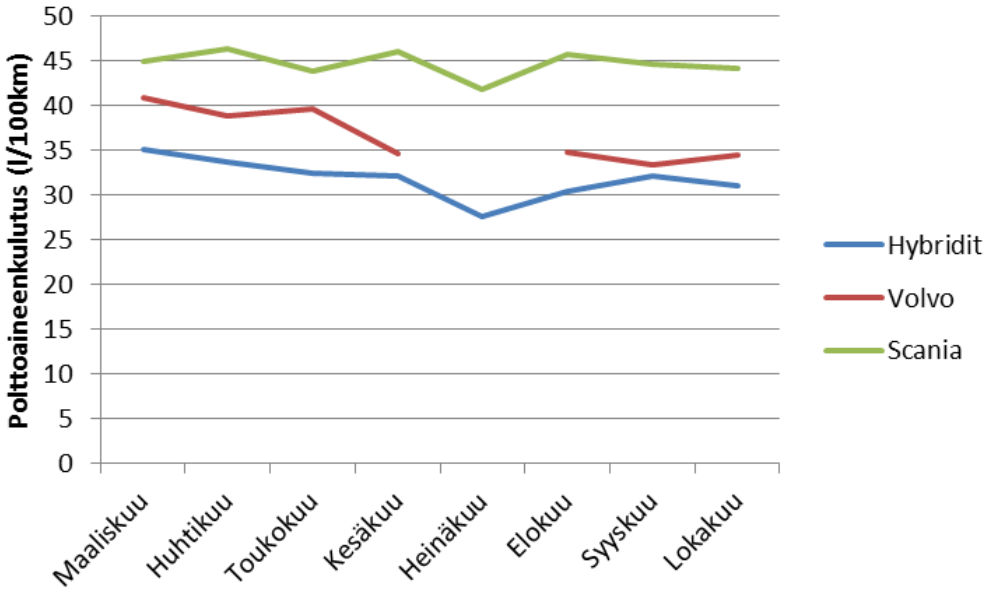
Tampereella otettiin käyttöön kaksi Solaris-merkkistä hybridibussia vuoden 2013 alussa. Näille määritettiin myös samoille linjoilla 21 ja 25 vertailukohdiksi dieselbussit, joista toinen on Scanian Euro 4-bussi (vuosimalli 2006) ja toinen Volvon EEV-bussi (vuosimalli 2011). Hybridibussit ja Scania ovat 12,9 metriä pitkiä, Volvo puolestaan 13,1 metriä pitkä. Scanian dieselbussissa oli jo aiemmin asennettu seurantalaite ja muihin busseihin asennettiin EC-Tools Oy:n toimittama seurantalaite. Seurannassa oli runsaasti ongelmia ja kuljettajakohtaista seurantaa ei saatu lainkaan toimimaan. Kuljettajatunnusta ei saatu rahastuslaitteesta, kuten Turussa, vaan sen saamiseksi olisi tarvittu erillistä kuljettajan ja auton tunnistautumista rahastuslaitteeseen ja muutoksia rahastuslaitteen taustajärjestelmään. Ongelmia aiheutti myös Scaniassa ollut seurantalaite, joka oli vanhempaa mallia kuin seurantaa varten asennetut kolme muuta laitetta, eikä EC-Tools saanut laitteiden tietoja vertailukelpoisiksi.

Tankattujen polttoainemäärien perusteella polttoaineenkulutusta voidaan verrata (kuva 36). Maalis-lokakuun aikana kahden hybridibussin kulutus oli keskimäärin 31,6 l/100km ja kulutus vaihteli maaliskuun 35 l/100km heinäkuun 27,6 l/100km välillä. Volvon dieselbussin kulutus oli keskimäärin 36,7 l/100km eli hybridibussien kulutus oli 14 % pienempi. Volvon kulutus vaihteli kuukausittain maaliskuun 40,7 l/100km syyskuun 33,3 l/100km välillä ja ero hybridibussiin oli 3-18 %. Heinäkuussa Volvolla oli vähän ajoja ja kulutus poikkeuksellisen suuri 49,2 l/100km, jos heinäkuun kulutus jätetään pois tarkastelusta, Volvon kulutus oli keskimäärin 36,5 l/100km ja ero hybrideihin 13 %. Scanian dieselbussin kulutus oli keskimäärin 44,5 l/100km eli hybridibussin kulutus oli 29 % pienempi. Scanian kulutus vaihteli kuukausittain huhtikuun 46,3 l/100km heinäkuun 41,8 l/100km välillä ja ero hybridibussiin oli 22–34 %.

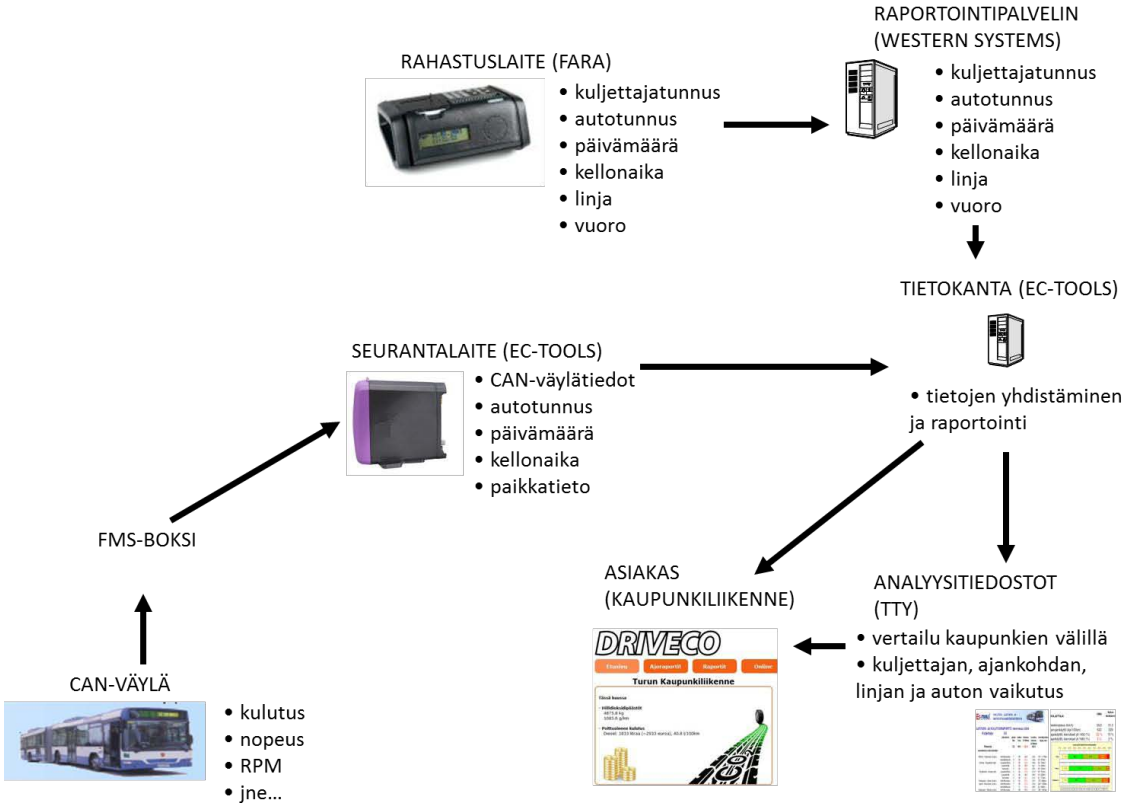
5.3 Turku

Turun Kaupunkiliikenteellä on käytössä 4 Volvon hybridibussia (vuosimalli 2011). Seurantatutkimusta varten kaksi näistä varustettiin EC-Tools Oy:n seurantalaitteilla. Lisäksi kaksi Scania-merkkistä dieselbussia (vuosimalli 2006 ja 2007) varustettiin seurantajärjestelmillä. Hybridibusseista saatiin tietoa heinäkuusta 2012 alkaen, mutta Scanioiden seurantalaitteiden teknisten ongelmien vuoksi vertailutietoa saatiin helmikuusta 2013 alkaen, jolloin myös kuljettajakohtaisen tiedon keruu alkoi toimia. Kuljettajakohtaista tietoa saatiin hybridibusseista takautuvasti heinäkuusta 2012 lähtien.

Turussa käytössä oleva seurantajärjestelmä tuottaa jatkuvasti tietoa polttoaineenkulutuksesta, ajetusta matkasta sekä ajonopeudesta, mutta tieto paketoidaan 10 minuutin, tai auto sammutettaessa lyhemmiksi, seurantajaksoiksi. Seurantajaksoja on linjoilta 3/30 ja 4/40 yhteensä 49970 kappaletta helmi-syyskuun 2013 ajalta. Polttoaineenkulutus saatiin kolmesta autosta vain litran tarkkuudella, mikä heikentää kulutuslukemien luotettavuutta, mutta suuressa datamäärässä tämän epätarkkuuden vaikutus on pieni. Vertailussa tankattuihin litroihin lokakuussa 2012 hybridibussien keskikulutus oli seurantalaitteiden perusteella toisessa hybridibussissa 29,3 l/100km ja toisessa 32,9 l/100km ja tankkaustiedon perusteella vastaavasti 30,6 l/100km ja 33,6 l/100km, ero kulutuksessa seurantalaitteen ja tankkaustiedon välillä oli siis 4 % ja 2 %. Eroon vaikuttaa se, että tankkaustieto ottaa huomioon myös polttoainekäyttöisen lämmittimen kulutuksen, seurantalaite vain moottorin käyttämän polttoaineen. Kuljettajakohtaisen tiedon keruu toteutettiin kuvassa 37 esitetyllä tavalla.



Kuva 36. Keskikulutus Tampereen seurantabusseilla tankkausten perusteella.



Kuva 37. Turun kaupunkiliikenteen polttoaineenkulutustiedon seurantajärjestelmä

Seurantabussit liikennöivät pääasiassa linjoilla 3/30 ja 4/40, joten vain näillä linjoilla tehdyt ajot otettiin analyysissä huomioon. Helmi-syyskuun 2013 aikana seurantabussit ajoivat yhteensä 116 000 km ja kuluttivat 42 800 litraa polttoainetta. Bussien keskikulutukset on esitetty taulukossa 5. Linjalla 4/40 hybridin kulutussäästö dieseliin verrattuna on ollut hieman linjaa 3/30 pienempi. Tämä johtunee siitä, että ko. linjalla matkustajia on enemmän, joten auto liikkuu suuremmalla kokonaismassalla, ja korkeuserot ovat suuremmat, jolloin hybridiauton pieni dieselmoottori joutuu ilmeisesti toimimaan epäedullisen korkealla kuormitusasteella. Lisäksi pysähdyksiä tällä pidemmällä linjalla on harvemmin kuin linjalla 3/30, joten tuloksena saatu pienempi säästöprosentti tukee yleistä käsitystä siitä, että suurin hyöty hybridistä saavutetaan tiheitä pysähdyksiä ja kiihdytyksiä sisältävässä ajossa.

VTT:n mittauksissa (luku 2.2) saavutetut pienimmät kulutuslukemat olivat siis samaa suuruusluokkaa, mihin Turussa on parhaimmillaan päästy (n. 30 l/100 km). Luvussa 4.4 esitetyissä simuloinneissa ennakoitiin linjalla 3/30 hybridin kuluttavan noin 21 % vähemmän polttoainetta kuin dieselin, hybridin keskikulutuksen ollessa noin 33 l/100km ja dieselin keskikulutuksen noin 42 l/100km. Seurannassa havaitut kulutukset ovat hybridien osalta samalla tasolla kuin simuloinnissa ennakoidut alhaisimmat kulutukset ja dieselien osalta puolestaan korkeammat kuin simuloinnissa ennakoidut korkeimmat kulutukset. Simuloinnissa keskinopeus linjalla 3 oli noin 18 km/h, eli hieman korkeampi kuin seurannassa toteutunut keskinopeus. Simuloinnissa käytetyt bussien ominaisuudet eivät myöskään vastaa täysin seurantabussien ominaisuuksia. Nämä selittävät kulutuseroja simuloinnin ja seurannan välillä.

Taulukko 5. Keskikulutukset linjoittain seurantajaksolla.

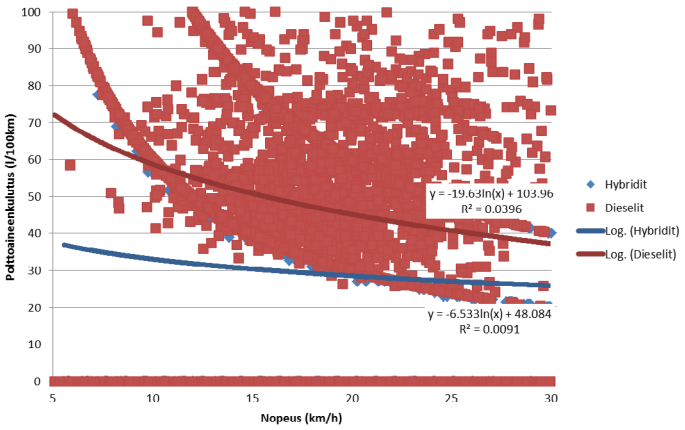
Linja	Kulutus hybridit (l/100km)	Kulutus dieselit (l/100km)	Kulutusero hybridi/diesel	Keskinopeus (km/h)
3/30	30,3	49,6	-38,9 %	14,6
4/40	31,6	46,4	-32,0 %	14,9
Yhteensä	30,8	48,1	-35,9 %	14,7

Keskinopeuden vaikutus

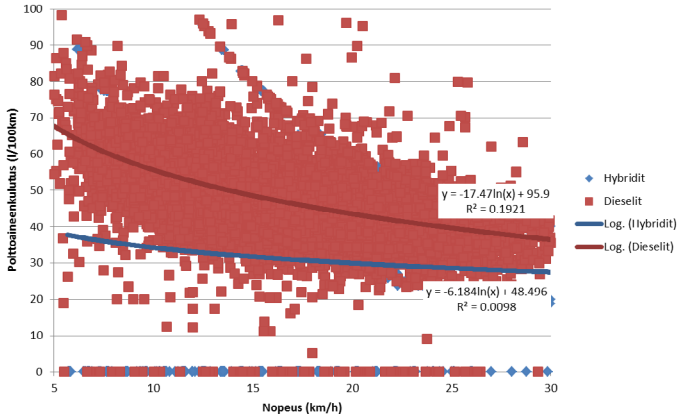
Kuten kirjallisuuskatsauksessa huomattiin, keskinopeudella on suuri merkitys hybridibussilla saavutettaviin polttoainesäästöihin. Seurantadatan pohjalta voidaan tarkastella keskinopeuden vaikutusta hybridien ja dieselien polttoaineenkulutukseen Turussa. Tarkastelussa käytetään bussien tyypillisellä keskinopeusalueella 5-30 km/h toteutuneita kulutuksia kullakin 10 minuutin seurantajaksolla. Keskinopeusalueella 5-30 km/h on 95 % seurantajaksoista. Kulutus-keskinopeuspisteiden perusteella busseille voidaan määrittää keskimääräinen kulutus nopeuden funktiona linjoilla 3/30 ja 4/40 (kuvat 38 ja 39). Funktion muoto on tällä nopeusalueella logaritminen.

Kirjallisuudessa hybridibussin on havaittu säästävän tyypillisesti 10–30 % polttoainetta dieselbussiin verrattuna. Clark et al. (2009) mukaan säästö riippuu ensisijaisesti linjan keskinopeudesta. Sama havainto tehtiin tässä tutkimuksessa Turun seurannassa. Mitä hitaampi, eli enemmän jarrutuksia ja kiihdytyksiä sisältävä, linja on kyseessä, sitä suuremmat säästöt hybridibussilla saadaan. Hybridi- ja dieselbussin kulutusero pienenee keskinopeuden kasvaessa kuvan 40 mukaisesti.

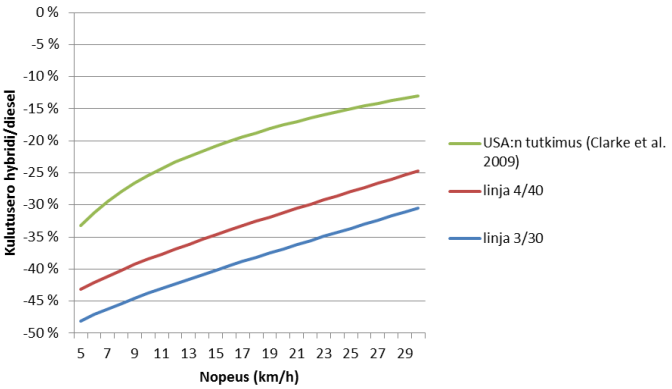
Kulutuseron pieneneminen on Turun mallikulutusten perusteella samankaltainen kuin Clarkin et al. (2009) tutkimuksessa USA:ssa havaittu. Turun seurannassa havaittiin kuitenkin huomattavasti suurempi kulutusero hybridibussien hyväksi kuin Clarkin et al. (2009) tutkimuksessa. Tämä voi osaltaan johtua hybriditeknologian kehityksestä viime vuosien aikana, mikä on kasvattanut hybridibusseilla saavutettavaa polttoaineenkulutussäästöä. Osittain tämä voi johtua myös Turun seurantabussien välisestä ikäerosta, dieselbussit olivat noin 5 vuotta vanhempia kuin hybridit. Tämän aikakauden (Euro IV) moottoreille oli tyypillistä, että typen oksidien päästörajoihin päästiin polttoaineen ruiskutusta myöhäistämällä, mikä yleensä kasvattaa kulutusta. Ero hybridin hyväksi olisi pienempi, jos vertailukohtana olisi hybridien kanssa samanikäinen eli vuoden 2011 dieselbussi. Tätä tukevat Tampereen seurannan tulokset, joissa havaittiin selvästi suurempi kulutusero Solaris-hybridien ja vanhemman Scania-dieselbussin (29 %) kuin hybridien ja uuden Volvo-dieselbussin välillä (14 %). Turun ja Tampereen Scania-dieselbussit ovat samaa tyyppiä ja ikäluokkaa.



Kuva 38. Keskinopeuden vaikutus polttoaineenkulutukseen linjalla 3/30.



Kuva 39. Keskinopeuden vaikutus polttoaineenkulutukseen linjalla 4/40.



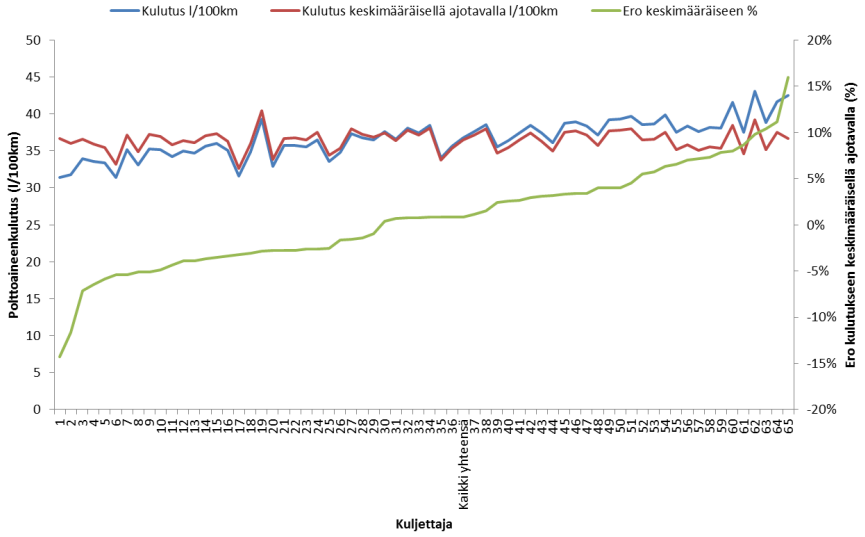
Kuva 40. Hybridi- ja dieselbussin kulutusero keskinopeuden mukaan. (muokattu lähteestä Clark et al. 2009)

Kuljettajan ajotavan vaikutus

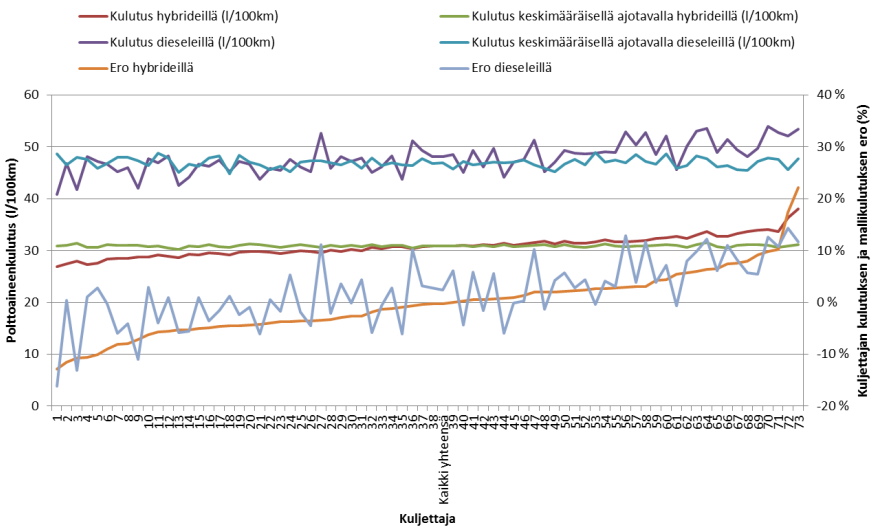
Mallikulutusfunktioiden avulla voidaan tarkastella myös kuljettajien ajotavan vaikutusta polttoaineenkulutukseen. Mallikulutusfunktiot ottavat huomioon bussityypin (hybridi vai diesel), linjan ja keskinopeuden. Mallikulutusfunktiot määrittävät, mikä olisi keskimääräisellä ajotavalla polttoaineenkulutus hybridi- tai dieselbussilla linjalla 3/30 tai 4/40 tietyllä keskinopeudella. Toteutuneita kulutuksia voidaan verrata tähän mallikulutukseen jokaisella seurantadatan 10 minuutin pätkällä, jolloin nähdään kuljettajien ajotavasta johtuvat erot. Kuvassa 41 on verrattu toteutunutta kulutusta mallikulutukseen niiden 65 kuljettajan osalta, joilla oli yli 1000 km ajoja seurantabusseilla.

Kuvassa vertaillut kuljettajat ajoivat diesel- ja hybridibusseilla yhteensä 103 221 km ja polttoaineenkulutus oli 37 974 litraa ja keskikulutus siten 36,8 l/100km. Mallilla laskettu polttoaineenkulutus oli 37 651 litraa ja keskikulutus 36,5 l/100km, joten mallilla lasketun kulutuksen virhe on 0,9 % todelliseen kulutukseen. Suurimmalla osalla kuljettajista toteutuneen kulutuksen ero mallikulutukseen on alle 10 % suuntaan tai toiseen. Kahdella kuljettajalla toteutunut kulutus on yli 10 % pienempi kuin mallikulutus ja kahdella kuljettajalla yli 10 % suurempi kuin mallikulutus.

Toteutuneen kulutuksen ja mallikulutuksen eroja voidaan tarkastella myös bussityypeittäin (Kuva 42). Tarkastelussa ovat mukana ne kuljettajat, joilla oli vähintään 200 km ajoja sekä hybridi- että dieselbusseilla. Tällaisilla kuljettajilla oli yhteensä ajoja 75 140 km hybridibusseilla ja 40 724 km dieselbusseilla. Toteutunut polttoaineenkulutus oli 23 176 litraa hybrideillä ja 19 589 litraa dieseleillä. Mallilla laskettujen kulutusten ollessa vastaavasti 23 229 litraa ja 19 127 litraa, mallikulutusten virhe on näin ollen hybrideillä 0,2 % ja dieseleillä 2,4 % toteutuneisiin kulutuksiin nähden. Kuvasta nähdään, että erot toteutuneiden ja mallikulutuksen välillä ovat kuljettajittain samaa luokkaa hybridi- ja dieselbusseilla. Erot ovat suurimmillaan -13 % ja +22 % hybrideillä ja -16 % ja +14 % dieseleillä. Kulutuseroilla hybridibussien ja dieselbussien välillä on vahva korrelaatio, korrelaatiokerroin on 0,7. Tämä tarkoittaa, että taloudellisesti hybridibussilla ajava ajaa todennäköisesti taloudellisesti myös dieselbussilla ja päinvastoin.



Kuva 41. Kuljettajien toteutuneen polttoaineenkulutuksen ja mallikulutuksen vertailu.

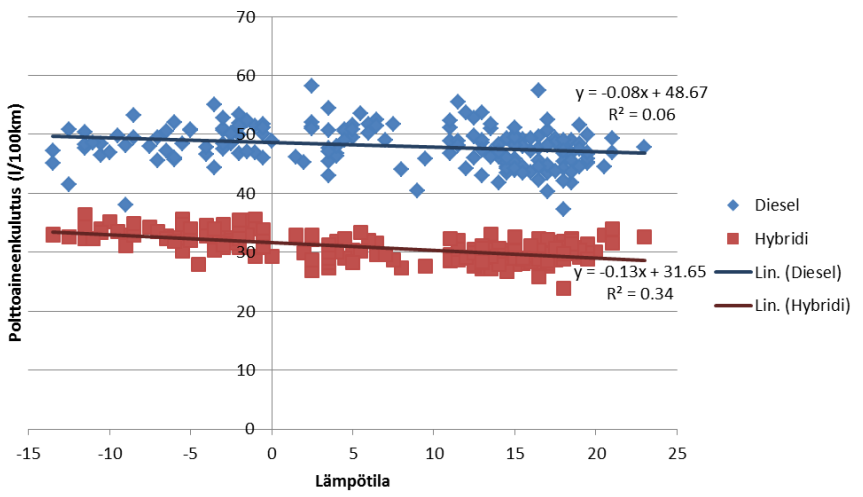


Kuva 42. Kuljettajien toteutuneen kulutuksen ja mallikulutuksen ero hybridi- ja dieselbusseilla.

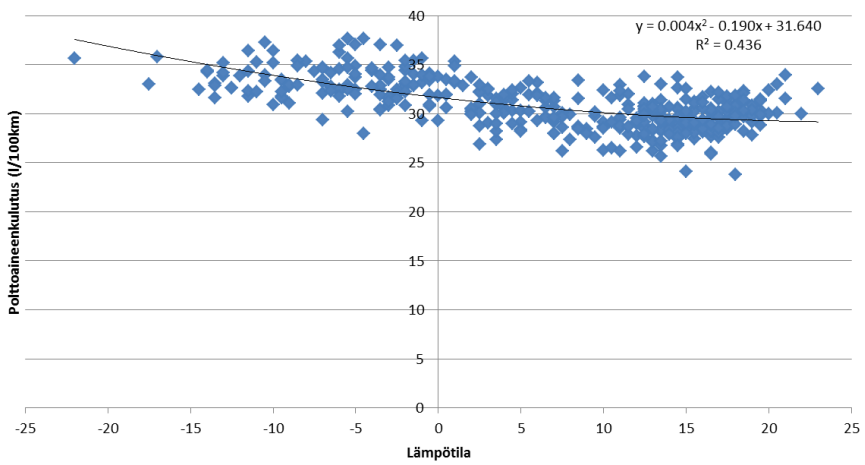
Lämpötilan vaikutus

Suuri datamäärä mahdollistaa myös analyysin lämpötilan vaikutuksesta polttoaineenkulutukseen. Jokaiselle seurantapäivälle haettiin päivän ylin ja alin lämpötila (Freemeteo 2013) ja näiden keskiarvona laskettiin päivän keskilämpötila. Jokaisen seurantapäivän polttoaineenkulutuksen ja liikennesuoritteen perusteella voidaan laskea päivän keskikulutus ja keskikulutusta päivän keskilämpötilaan vertaamalla nähdään lämpötilan vaikutus. Kuvasta nähdään, että lämpötilan lasku vaikuttaa enemmän hybridibussin kuin dieselbussin polttoaineenkulutukseen. Dieselbussilla kulutus pienenee 0,08 l/°C lämpötilan noustessa, kun hybridibussilla kulutuksen vähenemä on 0,13 l/°C. Kirjallisuuskatsauksessa havaittiin, että talvella hybridibussin polttoainesäästö oli noin 4 prosenttiyksikköä pienempi kuin keväällä tai syksyllä (Hallmark et al. 2010). Turun havainnot ovat samansuuntaisia, Kuva 43 trendiviivojen mukaisista kulutuksista laskettu kulutusero on -10 °C lämpötilassa 33,4 % ja +15 °C lämpötilassa 37,4 %.

Hybridibussien toteutuneet päiväkulutukset näyttävät olevan yli +20 °C lämpötilassa selvästi lineaarisen trendiviivan yläpuolella, mikä johtuu ilmastoinnin käytöstä. Ilmiö näkyy vielä paremmin pelkästään hybridibussien kulutusta tarkastellessa pidemmällä aikavälillä heinäkuusta 2012 syyskuuhun 2013 (Kuva 44). Pistejoukkoon sopii lineaarista trendiviivaa paremmin polynominen toisen asteen yhtälö, joka ei tosin sekään käänny takaisin kasvusuuntaan suurimmilla lämpötiloilla, mutta polttoaineenkulutuksen lasku selvästi taittuu.



Kuva 43. Lämpötilan vaikutus polttoaineenkulutukseen.



Kuva 44. Lämpötilan vaikutus hybridibussien polttoaineenkulutukseen.

6. Hybridibussien optimaalinen ajotapa ja kuljettajakoulutus

Turun AMK:n pääasiallisena tehtävänä hybridibussihankkeessa oli kuljettajien ajotapakoulutus. Tavoitteena oli selvittää, vodaanko polttoaineensäästöä saavuttaa kuljettajien yleistä taloudellisuusajotietoisuutta lisäämällä sekä perehdyttämällä heitä erityisesti ajotapaan, jolla hybriditekniikan tarjoama taloudellisuus pystytään hyödyntämään maksimaalisesti. Koulutus toteutettiin kaksiosaisena. Kukin kuljettaja osallistui ensin ryhmämuotoiseen kahden tunnin keskustelevaan luokkaopetustyyppiseen koulutussessioon sekä sen jälkeen henkilökohtaiseen ohjaukseen ajaessaan hybridibussia normaalilla linjalla. Luokkaopetuksen kesto oli 2 tuntia ja henkilökohtaisen ohjauksen kesto oli Turun paikallisliikenteen linjan 3 tai 30 edestakaiseen ajamiseen kuluneen ajan verran eli noin 2 x 20 minuuttia. Lisäksi hyödynnettiin mahdollista odotusaikaa reitin kääntöpisteessä.

Kuljettajakoulutuksen lisäksi Turun AMK vertaili erilaisten ajotapojen kulutuseroja simuloimalla normaalilla linjalla ajamista muulta liikenteeltä suljetulla alueella sekä selvitti Euroopassa saatavilla olevien hyb¬ridi-bussien tekniikkavaihtoehtoja ja markkinatilannetta (luku 2.1).

6.1 Kuljettajakoulutuksen tausta

Turun AMK:ssa jo aiemmin meneillään olleessa tutkimuksessa havaittiin, että taloudellisen ajon koulutukset tuottavat kaupunkiajossa eri kuljettajilla tyypillisesti 10–40 %:n kulutus¬vähenemän koulutusta edeltä¬neeseen tilanteeseen verrattuna. Keskimääräinen koulutuksen aikaansaama säästö on ollut noin 20 %. Säästöprosenttien kuljet¬taja¬kohtainen vaihtelu aiheutuu kuljettajien erilaisista ajotavoista ennen kou-lutusta: erittäin epätaloudel¬lisen ajotavan omaksi tyylikseen omaksuneen kuljettajan on mahdollista saavuttaa suurempi säästö koulutuksen seurauksena kuin kuljettajan, jonka ajotapa on kohtalaisen taloudellinen jo ennen koulutusta.

Kokonaan toinen asia on se, kuinka moni koulutetuista on tarpeeksi motivoitunut noudattaakseen saamaansa oppia pysyvästi. Tämä ongelma näyttäytyi myös bussinkuljettajakoulutuksen yhteydessä epäilynä siitä, että henkilökohtaisen normaalilla bussilinjalla toteutetun käytännön koulutuksen aikana ajotapa saattoi ainakin joillakin kuljettajilla olla erilainen kuin normaalisti, jolloin ajotapa ei ole erityisen tarkkailun alla.

Ajotapakoulutuksen kohdentaminen yleisten taloudellisen ajon periaatteiden lisäksi hybriditekniikkaan liittyviin erityiskysymyksiin perustui Turun AMK:n kokemukseen taloudellisesta ajotavasta hybridihenkilö-autolla (Toyota Prius). Hankkeen aikana osoittautui kuitenkin, että hybridibussin käyttäytyminen ja toiminta poikkeavat selvästi vähemmän perinteisestä dieselbussista kuin minkä verran em. hybridihenkilöauto poikkeaa tavallisesta polttomoottorikäyttöisestä henkilöautosta. Näin ollen osoittautui, että hybridibussin ajamisessa mahdollisimman taloudellisesti on vähemmän eroja tavallisen bussin ajamiseen kuin hybridi-henkilö¬auton ajamisessa verrattuna tavalliseen.

6.2 Teoriakoulutuksen toteutus ja sisältö

Teoriakoulutus toteutettiin syksyn 2012 aikana useassa 10–20 kuljettajan ryhmässä. Koulutussessiot pyrittiin sijoittamaan siten, että ne sopivat mahdollisimman hyvin kuljettajien normaalien työvuorojen yhteyteen. Osa ryhmistä kokoontui Turun Kaupunkiliikenne Oy:n tilojen kanssa samassa rakennuksessa sijaitsevan K1-Katsastajat Oy:n luokkatilassa osoitteessa Rieskalähteentie 76 (kuva 45), ja osa Turun AMK:n Sepänkadun toimipisteen tiloissa (Sepänkatu 1).

Kahden tunnin mittaisen vuorovaikutteisuuteen, keskustelevuuteen ja motivointiin tähdänneen koulutus-session otsikot olivat seuraavat:

OSA I: Taloudellisesta ajamisesta yleensä

- ***Miksi kannattaa ajaa taloudellisesti?***
- ***Polttoaineenkulutuksen osatekijät***
- ***Energiankäytön jakautuminen maantienopeudella***
- ***Auto ja sen kunto***
- ***Kiihdyttäminen ja hidastaminen, vaihteiden käyttö, ajonopeudet***

OSA II: Taloudellinen ajaminen bussinkuljettajana

- ***Energian muunnosprosessi ajoneuvoissa***
- ***Miten polttomoottorin taloudellisuus vaihtelee?***
- ***Bussin liike-energia***
- ***Milloin on pakko pysähtyä?***
- ***Polttoaine-energian jakautuminen hybridibussissa***
- ***Miten ajetaan bussilla järkevästi?***
- ***Miksi hybriditekniikka alentaa kulutusta***
- ***Miten hybridibussin taloudellisuudesta saadaan kaikki irti***
- ***Volvo 7700 Hybrid***
- ***Järkevän ajotavan tuomat hyödyt***

Kuva 45. Näkymä kuljettajien teoriakoulutussessiosta 24.10.2012

Taloudellisen ja ennakoivan ajotavan hyödyistä todettiin, että polttoaineen ja rahan säästön lisäksi saavutetaan myös seuraavia hyötyjä:

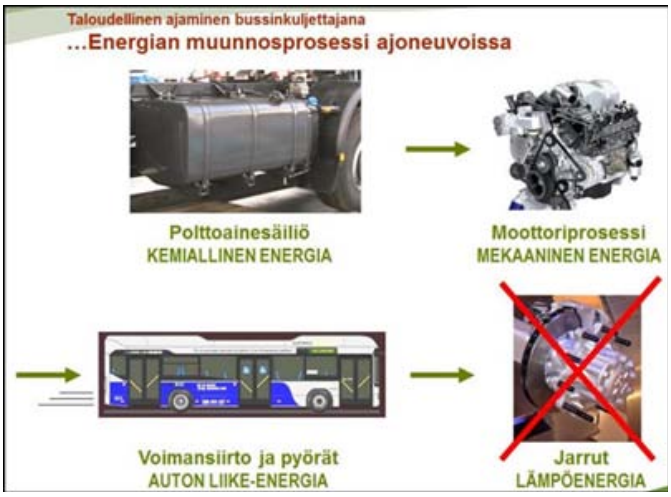
- ***Kasvihuoneilmiötä kiihdyttävän CO2:n päästöt vähenevät***
- ***Ajamisen stressaavuus vähenee***
- ***Ajamisen kiinnostavuus lisääntyy***
- ***Liikenneturvallisuus paranee***
- ***Tankkausvälit harvenevat***
- ***Auton huollontarve ja kuluminen vähenevät***

Ajoneuvon polttoaineenkulutuksen muodostumisesta yleensä todettiin, että se syntyy kolmen osatekijän yhteisvaikutuksesta. Nämä ovat auto, ajo-olosuhteet sekä kuljettajan toiminta. Valitettavan usein haluttua suuremmasta kulutuksesta syytetään autoa, eli olosuhteiden vaikutus aliarvioidaan ja kuljettajan osuus jopa kokonaan unohdetaan.

Ajoneuvon osuus kulutuksesta muodostuu ajovastuksista (ilman-, vierintä- ja kiihdytysvastus) sekä moot-torin ja apulaitteiden hyötysuhteesta. Kulutukseen vaikuttavia olosuhdetekijöitä ovat esim. ajotehtävän luonne (kaupunki, maantie, ajonopeus, pysähdykset, ruuhkat, kylmäkäynnistysten määrä) sekä myös keli, lämpötila, tien kuluneisuus, mäkisyys jne. Kulutukseen vaikuttavia olosuhdetekijöitä ovat myös tuulen voimakkuus ja suunta sekä ajoreitin pinnanmuodot sekä lähtö- ja päätepisteen välinen korkeusero. Kuljettajan vaikutus¬mahdollisuuksien piiriin taas kuuluvat kiihdytykset, hidastukset, vaihteiden käyttö, moottorin hyöty¬suhteen ja ajoneuvon liikkeen hyödyntäminen sekä apulaitteiden käyttö (ilmastointi, sähkölaitteet jne.)

Auton kunnon osalta koulutuksessa painotettiin, että huolloista on huolehdittava, viat korjattava ja rengas-paineet on muistettava tarkistaa riittävän usein, koska vajaa rengaspaine kasvattaa vierintävastusta ja nostaa kulutusta pienillä nopeuksilla ajettaessa jopa 5-10 %. Lisäksi renkaan ulkonäöstä vajaata painetta ei välttämättä havaitse. Useissa tapauksissa painetta voidaan nostaa hieman suositellusta, jos halutaan minimoida vierintävastus ja polttoaineenkulutus.

Energianmuunnosprosessia ajoneuvossa havainnollistettaessa (kuva 46) tavoitteena oli painottaa, että liikkeelle saadulla massalla on suuri arvo sinänsä. Tämä tarkoittaa nopeuden ylläpitämistä eli hidastusten minimointia ennakoinnin avulla, josta seuraa automaattisesti uudelleen kiihdyttämisen tarpeen mini-moituminen. Tämä on tärkeimpiä yksittäisiä taloudellisen kaupunkiajamisen periaatteita.



Kuva 46. Esimerkki teoriakoulutusmateriaaliin kuuluneesta esityskalvosta

Kiihdytysten minimointiin päästään mm. aikaisilla ennakoivilla hidastuksilla, joiden aikana liikenne-este ehtii mahdollisesti väistyä, jolloin ajo voi jatkua vähäisemmällä hidastuksella ja uudelleen kiihdyttämisen tarpeella kuin silloin, jos joudutaan hidastamaan enemmän tai pahimmassa tapauksessa kokonaan pysähtymään. Kaupunkibussiliikennöinnissä pysäkille on tietenkin pysähdyttävä, jos sieltä on tulossa matkustajia, tai jos autossa olevia matkustajia haluaa jäädä kyydistä pois. Sen sijaan liikennevaloista ja muista syistä kuin pysäkeistä aiheutuvien pysähtymis- ja kiihdytystarpeiden määrään kuljettaja voi ennakoivilla hidastuksilla ja oikealla asenteellaan vaikuttaa.

Moottorin edullisimman hyötysuhdealueen käyttö konkretisoituu kiihdytyksissä, jotka tulisi suorittaa moottoria kohtalaisen runsaasti kuormittaen eli ripeästi, mutta aikaisin suuremmille vaihteille vaihtaen, jotta moottorin pyörintänopeudet säilyisivät matalina. Automaattivaihteisissa autoissa tämä edellyttää kaasupolkimen ajoittaista keventämistä kiihdytyksen mittaan, jotta saadaan vaihteisto vaihtamaan suuremmille vaihteille taloudellisuuden kannalta riittävän pienillä pyörintänopeuksilla.

Hybridiajoneuvolla voidaan ottaa osa jarrutusenergiasta generaattorin avulla talteen. Tämä mahdollisuus on yksi hybriditekniikan taloudellisuuden kulmakivistä ja on selvä etu ei-hybridiautoihin nähden. Samaan hengenvetoon on kuitenkin mainittava, että liike-energian muuntamiseen sähköksi ja taas takaisin liikkeeksi sisältyy energiamuunnoksiin liittyvien luonnonlakien perusteella aina häviöitä. Näin ollen vielä talou¬dellisempaan etenemiseen päästään, jos nopeutta voidaan aina mahdollisuuksien mukaan pitää yllä eikä jouduta turvautumaan edes regeneratiivisen jarrutuksen käyttöön.

6.3 Käytännön koulutuksen toteutus

Käytännön koulutus tapahtui siten, että kouluttaja oli mukana kunkin kuljettajan kyydissä hänen ajaessaan bussia normaalilla linjalla. Kouluttajina toimivat Markku Ikonen sekä Rami Wahlsten. Koulutus toteutettiin tammi – toukokuun 2013 välisenä aikana.

Kaikkiaan 71 kuljettajaa koulutettiin (Ikonen 38, Wahlsten 28, kouluttajat yhdessä 5 kuljettajaa). Pyrki-myksenä oli saada aikaan vuorovaikutteista keskustelua sekä haastaa kuljettaja itse ajattelemaan toimin-taansa sekä sen mahdollista parantamista. Koulutuksessa huomiota kiinnitettiin mm. seuraaviin seikkoihin:

- ***Kiihdytystapa (onko riittävän ripeä, kevennetäänkö kaasua vaihtamisten aikaistamiseksi)***
- ***Vaihtamiset (ks. edell. kohta)***
- ***Ennakointi, varhaiset hidastukset, auton liikkeen hyödyntäminen sekä turhien kiihdytysten välttäminen kohti edessä olevaa liikenne-estettä***

Koulutuksen yhteydessä auton kulutus kirjattiin muistiin sen omalta ajotietokoneelta erikseen meno-matkalta sekä edestakaiselta reitiltä. Reittitiedot rekisteröitiin GPS-paikannukseen perustuvalla navi-gaattorilla. Näihin kuuluivat seuraavat tiedot:

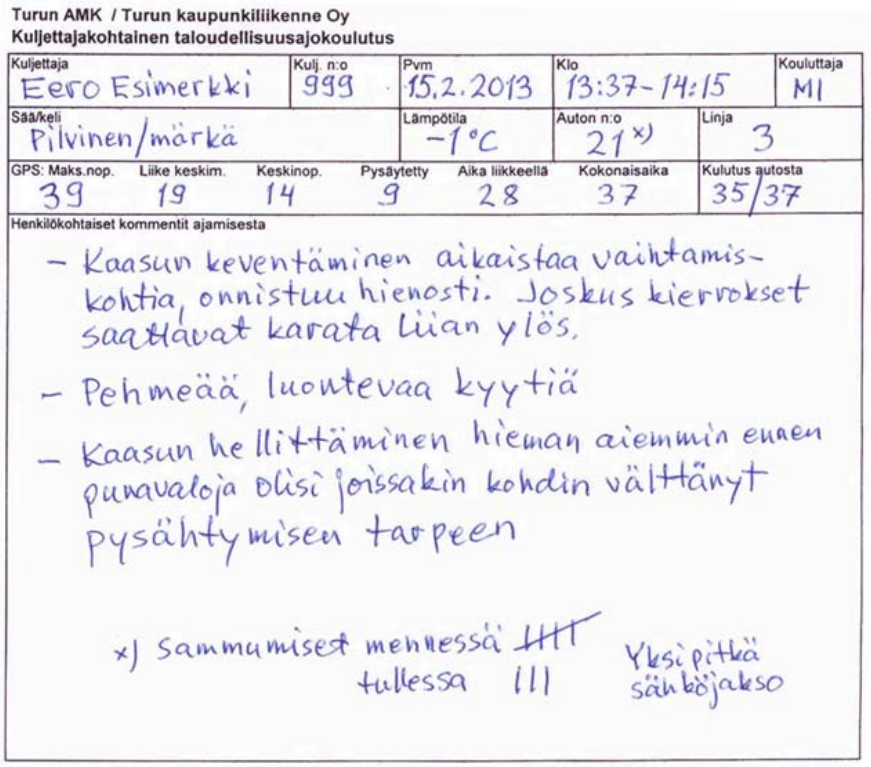
- ***Keskinopeus koko reitiltä***
- ***Keskinopeus auton liikkeen ajalta***
- ***Liikkeelläoloaika***
- ***Pysähdyksissäoloaika***
- ***Maksiminopeus***

Lisäksi suurimmalta osalta koulutuskerroista kirjattiin muistiin, kuinka monta kertaa moottori sammui pysäkillä seistessä. Näin havaittiin tapahtuvan selvästi alle puolessa tapauksissa pysähdyksistä, mikä oli vähemmän kuin oli kuviteltu. Lisäksi kirjattiin mahdolliset viat tai ongelmat kyseisen jakson ajalta sekä kerättiin kuljettajalta palautetta autoon liittyvistä kokemuksista.

Kuljettajan ajamisesta kirjattiin sekä oikeaoppisesti tehdyt asiat että mahdolliset kehityskohteet kou-lutuspöytäkirjaan, joka toimitettiin suoraan kullekin kuljettajalle henkilö¬kohtaisesti jälkikäteen (kuva 47). Myös edellä mainitut auton toimintaan sekä kuljettajan mielipiteisiin liittyvät asiat kirjattiin samaan lomakkeeseen. Lomakkeen yhteydessä kuljettajille annettiin myös muistilista taloudellisen hybridibussi-ajamisen yleisistä pääperiaatteista.

Koulutuksen aikana havaittiin, että taloudellisinta mahdollista ajotapaa (mahdollisimman aikainen ja loiva hidastaminen) ei ole välttämättä mahdollista hyödyntää ruuhka-aikoina, koska muu liikenne saattaa häiriintyä ja tämä myös vaikeuttaisi aikataulussa pysymistä. Hybridiauton kyseessä ollen oli hieman yllättävää, että aikaisen loivan hidastuksen havaittiin tuottavan pienimmän polttoaineenkulutuksen, vaikka liike-energiaa otetaan jarrutuksen aikana talteen. (ks. kohta ”Linjan 3 ja 30 simulointi Turun Artukaisissa” jäljempänä).

Ruuhka-aikana aikataulussa pysymisen havaittiin olevan vaikeampaa kuin muulloin kahdesta eri syystä: muun liikenteen runsaus hidastaa etenemistä ja pysähdyksiä pysäkeille tulee useammin kuin hiljaisina vuoro¬kaudenaikoina, jolloin vain harvoilla pysäkeillä on pysähdyttävä. Kulutuksen muodostumista tarkasteltaessa havaittiin, että merkittävin yksittäinen



Turun AMK / Turun kaupunkiliikenne Oy
Kuljettajakohtainen taloudellisuusajokoulutus

Kuljettaja	Kulj. n:o	Pvm	Klo	Kouluttaja
Eero Esimerkki	999	15.2.2013	13:37-14:15	MI

Sää/keli	Lämpötila	Auton n:o	Linja
Pilvinen/märkä	-1°C	21 x)	3

GPS: Maks.nop.	Liike keskim.	Keskinop.	Pysäytetty	Aika liikkeellä	Kokonaisaika	Kulutus autosta
39	19	14	9	28	37	35/37

Henkilökohtaiset kommentit ajamisesta

- Kaasun keventäminen aikaistaa vaihtamiskohtia, onnistuu hienosti. Joskus kierrokset saattavat karata liian ylös.
- Pehmeää, luontevaa kyytiä
- Kaasun hellittäminen hieman aiemmin ennen punavaloja olisi joissakin kohdin välttänyt pysähtymisen tarpeen

x) sammumiset mennessä ~~IIII~~ tullessa III

Yksi pitkä sähköjakso

Kuva 47. Esimerkki koulutuspöytäkirjasta.

kulutusta alentava tekijä on ne pysähdykset, jotka voidaan jättää tekemättä eli niiden pysäkkien määrä, joiden ohi ajetaan pysähtymättä. Harvoin tapahtuneet pysähtymiset näyttivät pienen¬tävän kulutusta jopa enemmän kuin mihin ajotapaeroilla oli mahdollista päästä. Tämä ei sinänsä ollut yllätys, mutta vähempien kiihdytysten kulutusta pienentävä vaikutus teki tämän teoreettisesti ottaen itsestään selvän asian hyvin konkreettiseksi.

Kuljettajien asennoitumisessa koulutukseen oli selviä eroja. Suurin osa suhtautui asiaan neutraalin asiallisesti, mutta joukossa oli myös monia asiasta selvästi kiinnostuneita ja erityisen motivoituneita. Valitettavasti myös muutamia päinvastaisia esimerkkejä osui kohdalle: asenne oli omahyväinen sekä koulutusta ja hybridiautoa väheksyvä. Osa maahanmuuttajataustaisista kuljettajista hallitsi suomen kieltä sen verran vähän, että tämä haittasi kommunikointia.

Vaikka suurin osa osoitti vastuullista toimintaa kuljettajana koulutuksen aikana, on tietysti aina mahdollista, että osa kuljettajista kenties ajaa käytännön ajossa eri tavalla kuin silloin, kun kouluttaja oli mukana linjalla.

Tämän selvittämiseksi olisi mielenkiintoista seurata edes joidenkin kuljettajien toimintaa pistokokeen-omaisesti siten, että kouluttaja hyppäisi ikään kuin tuntemattomana bussin kyytiin. Tätä hankaloittaa se, että kuljettaja saattaa tunnistaa kouluttajan. Toinen mahdollisuus voisi olla värvätä eri henkilö tähän tehtävään, mutta ulkopuolisella ei tietenkään olisi vastaavaa tuntumaa ja vertailupohjaa tehdäkseen kannanottoja ajotavan taloudellisuudesta.

Käytännön koulutuksen tulokset koottiin yhteenvetotaulukkoon, jonka osa on esimerkinomaisesti nähtävissä alla taulukossa 6.

6.4 Linjan 3 ja 30 ajosimulointi Turun Artukaisissa

Hybridibussin toiminnan havaittiin poikkeavan paljon hybridihenkilöauton (Toyota Prius) toiminnasta. Tämä käy selvimmin ilmi siitä, että hybridibussi ei edes yritä sammuttaa moottoriaan auton liikkuessa, vaikka sitä ei esim. hidastustilanteissa tarvita. Lisäksi havaittiin, että moottori ei kykene sammuttamaan itseään edes auton seistessä paikallaan kuin alle puolessa tapauksista. Tämän takia nähtiin aiheelliseksi tutkia, millaisilla kiihdytys- ja hidastustavoilla päästäisiin nimenomaan tällä autolla pienimpiin kulutuksiin.

Linjan 3/30 nopeuksia sekä pysäkkien määriä pystyttiin hyvin simuloimaan Turun Artukaisten messu-alueella, jossa osalla kaduista liikennöinti on sallittu vain busseilla. Näin pystyttiin ajamaan normaalia linjaa jäljittelevää ajoa ilman, että muu liikenne olisi häirinnyt toimintaa ja tuottanut hallitsemattomia muuttujia tutkimusasetelmaan. Polttoaineenkulutus mitattiin auton omalla tietokoneella, jonka tarkkuutta ei ole verifioitu, mutta tämä ei suoranaisesti haittaa, koska huomion kohteena olivat eri ajotapojen väliset erot eikä niinkään kulutuksen absoluuttinen taso.

Taulukko 6. Osa käytännön koulutuksen tulosten yhteenvetotaulukosta

N:o	Kuljet-taja	Pvm	Klo	Sää/keli	Lämpö-tila °C	Auto	Linja	Maks. nop. km/h	Liike keskim. km/h	Keski-nop. km/h	Pysäy-tetty min	Aika liikk. min	Kok. aika min	Kulutus autosta l/100 km	Koulut-taja
6	A	22.1.2013	11:30 -12.10	Kirkas/kuiva	-10	23	30	44	20	13	8	15	23	31	MI
7	B	22.1.2013	12:10-12:55	Kirkas/kuiva	-10	23	30	42	19	12	15	29	44	37	MI
8	C	22.1.2013	13:00-13:40	Kirkas/kuiva	-10	21	3	35	19	14	4	12	16	34	MI
9	D	24.1.2013	12:40-13:46	Kirkas/kuiva	-6	24	4	49	29	14				30	RW
10	E	24.1.2013	13:57-14:37	Kirkas/kuiva	-6	22	3	46	21	14	14	25	39	29	RW
11	F	4.2.2013	10:57 -	Pilvinen/liukas	0	21	3	48	21	14	10	17	27	34	RW
12	G	4.2.2013	12:17 - 12:56	Pilvinen/liukas	0	21	3	43	23	13	16	23	39	34	RW
13	H	5.2.2013	13:37 -	Räntäsade/sohjoa	0	21	3	-	-	-	-	-	-	33	MI
14	I	6.2.2013	8:37 - 9:15	Pilvinen/lämmärkää ja sohjoa	-1	22	3	40	-	12	-	-	-	33	RW
15	J	6.2.2013	9:37 -10:15	Pilvinen/lämmärkää ja sohjoa	-1	21	3	44	22	15	12	25	37	34	RW
16	K	6.2.2013	10:37 -11:15	Pilvinen/lämmärkää ja sohjoa	-1	22	3	49	22	13	18	24	42	33	RW
17	L	6.2.2013	16:37 - 17:18	Pilvinen/lämmärkää ja sohjoa	0	22	3	41	20	13	13	27	40	32	MI
18	M	6.2.2013	17:37 - 18:16	Pilvinen/lämmärkää ja sohjoa	0	21	3	42	20	14	11	27	38	30	MI
19	N	8.2.2013	14:10 - 14:51	Lumisade/pöllyävä lumi	-4	23	30	45	21	13	15	25	40	38	MI
20	O	8.2.2013	14:53 - 15:31	Lumisade/pöllyävä lumi	-4	23	30	49	21	14	12	26	38	34	MI
21	P	8.2.2013	15:57 - 16:39	Lumisade/pöllyävä lumi	-4	22	3	44	20	12	15	27	42	39	MI
22	Q	8.2.2013	16:43 - 17:20	Lumisade/pöllyävä lumi	-4	22	3	42	20	14	10	27	37	37	MI
23	R	11.2.2013	12:50 - 13:31	Kevyt lumisade/loskaa	0	22	30	40	19	13	12	27	39	27	RW
24	S	12.2.2013	10:10 - 10:50	Pilvinen/lämmärkä,hieman loskaa	-1	23	30	43	22	14	14	25	39	30	MI
25	T	12.2.2013	10:50 - 11:33	Pilvinen/lämmärkä,hieman loskaa	-1	23	30	39	18	13	11	30	41	33	MI
26	U	12.2.2013	11:37 - 12:19	Pilvinen/lämmärkä,hieman loskaa	-1	21	3	42	18	13	13	29	42	36	MI

Ajotapavertailussa ajettiin vastapäivään ympyräreittiä Artukaisten kiitotie – Arenakatu – Kirjaltajankatu – Messukentänkatu kaikkiaan 2,5 kierrosta (kuva 49). Lähtöpiste oli Artukaisten kiitotien eteläpäässä ja päätepiste Kirjaltajankadun suoran osuuden eteläisemmällä pysäkillä. Tämän reitin pituus vastasi suunnilleen reitin 3/30 pituutta yhteen suuntaan ajettuna. Reitillä olleiden pysäkkien määrä (ympyrät) vastasi tyypillistä keskimääräisen liikennemäärän aikaan vallinnutta pysähtymisten määrää reitillä 3/30 (12 pysäkkipysäh¬dystä). Jokaisella pysäkillä pysähdyttiin 30 sekunnin ajaksi.

Liikenne-esteiden aiheuttamia pysäkkien ulkopuolisia pysähdyksiä simuloivat reitillä olleet kaksi pakollista pysähtymistä (merkitty kuvaan 9) sekä ylimääräinen pysähdys joka kierroksella reitin lähtöpisteessä. Näitä oli yhteensä 7 kpl. Kaikkiaan pysähdyksiä reitillä oli 20 kpl loppupysähdys mukaan luettuna. Linjasimuloinnin tulokset on esitetty alla taulukossa 7.

Kuva 49. Linjaa 3/30 simuloinut testireitti Turun Artukaisissa

Taulukossa 7 esitettyjen ajotapaerojen selitys on seuraava:

Tapa 1: Varhainen kaasunnosto ja kevyt jarrutus pysäkeille ja STOP-merkeille

Tapa 2: Nopea pysäkkilähestyminen ja myöhäinen melko voimakas jarrutus akun lataamiseksi

Tapa 3: Kuten 1, mutta oven avaaminen pysäkeillä moottorin sammumisen edistämiseksi

Taulukosta havaitaan, että pienimpään kulutukseen (31 l/100 km) päästiin ajotavalla 3 eli hidastamalla var¬hain ja jarruttamalla vain kevyesti pysäkeille, sekä avaamalla ovi aina auton pysäkillä seisomisen ajaksi (30 sekuntia). Oven avaamisen havaittiin useissa tapauksissa lisäävän todennäköisyyttä moottorin sammu-miselle auton ollessa pai¬kallaan. Tässä tapauksessa moottorin sammumisten määrä lisääntyi ovea avaa-malla yhdellä eli 6:sta 7:ään. Hieman pienintä kulutusta suurempaan lukemaan (33 l/100 km) päädyttiin vastaavalla rauhallisella hidas¬tustavalla, mutta ilman auton oven avaamista (tapa 1).

Sen sijaan nopealla pysäkkilähestymisellä (tapa 2) kohtalaisen voimakkaine jarrutuksineen päädyttiin kulutus¬lukemaan 37 l/100 km, joka on lähes 20 % korkeampi kuin pienin tulos. Tämän perusteella voidaan sanoa, että yrityksestä hyödyntää hybridin regeneratiivista jarrutusta korostuneesti ei havaittu saatavan kulutushyötyä. Merkillepantavaa on, että voimakkaiden jarrutusten ollessa käytössä moottorin sam-mumiskerrat jäivät vain 4:ään kaikkiaan 20:stä, vaikka hybridiakun varaustilan olisi pitänyt olla korkeim-millaan. Voimakkaista jarrutuksista oli seurauksena minuutin nopeampi ajoaika (19 min 25 s) kuin rau-hallisempien hidastusten tapauksissa (keskiarvo 20 min 25 s).

Kulutukseen voimakkaimmin vaikuttavalta tekijältä näytti lähinnä joutokäynnin määrä eli ne kerrat, jolloin moottori sammui pysäkeillä. Näytti lähinnä sattumanvaraiselta, milloin moottori sammui ja milloin se pysyi käynnissä: esim. auton ilmoittamalla hybridiakun varaustilalla eikä myöskään pysähtymistä edel¬täneen jarrutuksen regeneraatio¬prosentilla näyttänyt olevan asiaan ainakaan ilmiselvää vaikutusta.

Taulukko 7. Linjoja 3 ja 30 simuloineiden kulutusvertailujen tulokset

Ajo-	Maksimi-	Keskinop.	Kokonais-	Aika	Aika	Kokonais-	Keski-	Laskettu keskinopeus		Sammu-
tapa *)	nopeus	liikkeellä	keskinop.	pysähd.	liikkeellä	aika	kulutus	liikkeellä	kokonais	miset
	km/h	km/h	km/h	min.s	min.s	min.s	l/100 km	km/h	km/h	kyllä/ei
Tapa 1	39	20	13	7.20	13.30	20.50	33	20.0	13.0	6/14
Tapa 2	40	21	13	6.50	12.35	19.25	37	21.5	13.9	4/16
Tapa 3	38	20	13	6.50	13.10	20.0	31	20.5	13.5	7/13

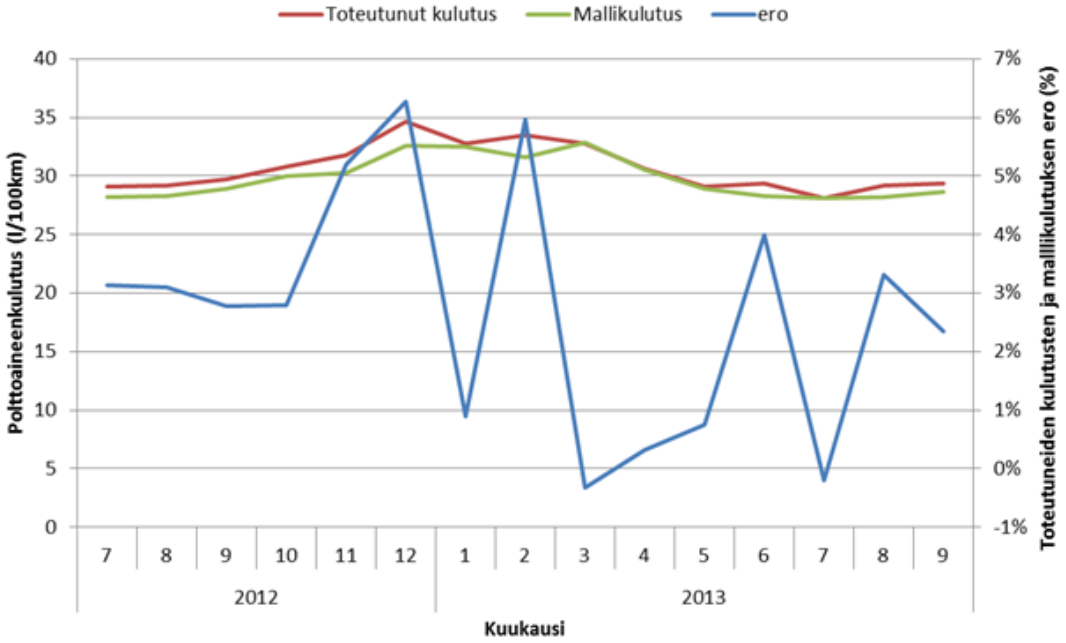
6.5 Kuljettajakoulutusten vaikutukset

Kuljettajakohtainen henkilökohtainen kulutuslukema on ilmoitettu kullekin kuljettajalle, jotta heistä kukin motivoituisi kiinnittämään asiaan huomiota ja pyrkimään mahdollisimman pieneen kulutukseen. Lisäksi heille on ilmoitettu keskimääräinen taso sekä saavutetut maksimi- ja minimikulutukset, kun kaikki kuljettajat on otettu huomioon. Ajatus menettelyn taustalla on, että kukin kuljettaja, joka on ajanut keskimääräistä kulutusta suurempia lukemia, motivoituisi pienentämään omaa kulutustaan vähintään keski-määräiseen tasoon. Ja jos näin tapahtuu, seuraava keskimääräinen taso on tietysti edellistä pienempi.

Linjalla 3/30 hybridibusseista saatiin kuljettajakohtaista kulutusdataa heinäkuusta 2012 alkaen. Tämän datan avulla voidaan arvioida kuljettajakoulutusten vaikutusta polttoaineenkulutukseen. Edellä luvussa 5.3 esitettyjen periaatteiden avulla muodostettiin hybridibusseille linjalle 3/30 mallikulutus, joka ottaa huomioon nopeuden ja lämpötilan. Keskinopeus on linjalla pysynyt kuukausitasolla melko vakiona, vaihtelu 13,6–13,9 km/h, joten kulutuksen vaihtelu johtuu lähinnä lämpötilan vaihtelusta. Toteutuneiden kulutusten ja mallikulutusten erossa on havaittavissa laskeva trendi, joskin kuukausivaihtelu on hyvin suurta (kuva 50). Laskevan trendin perusteella kuljettajien ajotapa olisi siis parantunut.

Koulutuksen vaikutuksia voidaan arvioida myös vertaamalla heinä-syyskuun tietoja vuosilta 2012 ja 2013 (taulukko 8). Kuljettajakoulutuksia ei oltu vielä aloitettu heinä-syyskuussa vuonna 2012 ja kaikki koulutukset oli saatu päätökseen heinä-syyskuussa vuonna 2013. Vertailu osoittaa, että toteutunut keskikulutus oli pienentynyt 1,8 % vuosien välillä, vaikka mallikulutuksen perusteella keskikulutuksen olisi pitänyt laskea 0,5 %. Kuljettajien ajotavan muutos selittää siis keskikulutuksen pienenemisen 1,3 prosentilla.

Näyttää selvältä, että kuljettajakoulutus on vähentänyt kulutusta. Hyvään kulutuskehitykseen ovat todennäköisesti vaikuttaneet osaltaan sekä koulutus että myös seurantalaitteiden asentaminen. Seurantalaitteiden vaikutus perustuu siihen, että kuljettajat ovat motivoituneempia tarkkailemaan ajo-tapaansa, koska tietävät henkilökohtaisen kulutuksen olevan jatkuvan seurannan alaisena.



Kuva 50. Hybridibussien toteutuneet kulutukset ja mallilla lasketut kulutukset linjalla 3/30 kuukausittain.

Taulukko 8. Kulutusvertailu heinä-syyskuussa 2012 ja 2013.

Vuosi	Toteutunut kulutus (l)	Mallikulutus (l)	Liikennesuorite (km)	Toteutunut keskikulutus (l/100km)	Mallikeskikulutus (l/100km)	Keskinopeus (km/h)
2012	9441	9166	32211	29,3	28,5	13,87
2013	4355	4283	15125	28,8	28,3	13,85
Muutos				-1,8 %	-0,5 %	

7 Käytännön kokemuksia hybridi-busseista

Hybridibussien luotettavuus on osoittautunut huonommaksi kuin oli odotettu. Korjaamolla vietettyjä päiviä on Turussa kertynyt kuukausittain lähes saman verran kuin dieselbusseille vuosittain. Yllättävää kyllä, monet korjaamokäyntejä vaatineet viat eivät olleet mitenkään hybridijärjestelmään liittyviä, kuten esim. ongelmat auton ovien kanssa. Korjaamokäyntejä on kertynyt myös hybridijärjestelmään liittyvistä syistä. Autoihin on tehty huoltosopimus, joten suoranaisia korjauskuluja ei ole liikennöitsijälle aiheutunut, mutta välillisiä kuluja sitäkin enemmän autojen ollessa usein poissa normaalista käytöstä. Helsingissä huoltotarve on ollut hybrideillä hieman suurempi kuin dieseleillä, mutta erityisesti huoltoon käytetty aika on ollut paljon suurempi, koska hybridit huolletaan Volvon toimipisteessä, dieselien huollon tapahtuessa HELB:n omalla varikolla. Volvon organisaatio on osoittanut kiinnostuksensa tutkimushankkeeseen ja mm. muuttanut saamansa palautteen perusteella autojen vaihteiston ohjelmointia jo hankkeen alkuvaiheessa.

Tampereella hybridibussien dieselbusseja pidempi huoltoväli on nähty positiivisena, hybridibussien huoltoväli on 30 000 km ja dieselbussien 20 000 km. Tampereellakin hybridibussien huoltotarve on ollut dieselbusseja suurempi, mutta suurena tekijänä tässä on ollut sähkötoimisten ovien ongelmat ja hybriditekniikka sinänsä on toiminut hyvin. Tampereella hybridibussien huoltotoiminta on ollut hidasta, koska huolto-organisaatiolla ei ole aiempaa kokemusta hybridibusseista ja englanninkielinen ohjeistus on aiheuttanut ongelmia. Solariksen tietoväylät ovat avoimia, mikä on koettu huoltoa nopeuttavaksi, koska vikakoodit voidaan helposti tarkistaa.

Tutkimusvaiheen aikana Turussa selvisi, että Volvon dieselmoottori ei sammu pysäkeillä suinkaan aina. Syy tähän on jäänyt epäselväksi. Toisinaan moottori sammuu ja toisinaan ei, vaikka hybridiakun varaustila näyttäisi olevan riittävä, eli edellytykset moottorin sammuttamiselle näyttäisivät olevan olemassa. Tilanteissa, joissa moottorin sammuminen on tapahtunut vain harvoin, koko hybridijärjestelmän nollaus on poistanut ongelman ainakin hetkellisesti. Osa kuljettajista on ollut riittävän motivoitunutta nollatakseen auton koko järjestelmän ottamalla päävirrat hetkeksi pois ajoreitin kääntöpisteen pysäkillä, jos tähän on ollut aikaa. Tämän jälkeen yleensä auto on toiminut ainakin jonkin aikaa moitteettomasti. Kaikki kuljettajat eivät kuitenkaan ole vaivautuneet tätä tekemään ja siksi auto saattaa kulkea pitkiäkin aikoja eräänlaisessa vikatilassa siten, että järjestelmä pitää moottorin varmuuden vuoksi koko ajan käynnissä. Tällöin hybriditekniikan edut eivät tule täysimääräisesti hyödynnetyksi. Yksi tarkoituksellinen syykin moottorin sammuttamatta jättämiseen on selvinnyt: jos auton pysähdyksissä ollessa sen keula on peräpäätä korkeammalla, moottoria ei sammuteta. Tällaisessa tilanteessahan auto joutuu liikkeelle lähtiessään lähtemään ylämäkeen. Moottorin sammuttamattomuuden periaate ylämäkeen lähdettäessä on ilmeisesti valittu tasamaalähtöä suuremman tehontarpeen takia hybridiakun liian nopean purkautumisen estämiseksi.

Solarikseen olisi haluttu dieselmoottorin sammutus automaattisesti pysäkkijarrun ollessa päällä, mutta tätä ominaisuutta Solaris ei ole toteuttanut, vaikka muuten TKL:n toiveita on kuunneltu erittäin hyvin ja esimerkiksi TKL:n toivoma vaihteisto-ohjelmisto on otettu Solariksen oletusohjelmistoksi. Pelkällä sähköllä Solariksella voi ajaa vain hyvin lyhyen matkan.

Kuljettajilta kerätyssä palautteessa Turusta on saatu Volvon hybridibussista mm. seuraavanlaisia kommentteja:

- ***Täydellä kuormalla teho ei riitä, väärä auto linjalle 4***
- ***Puskee alamäessä pysäkille käännettäessä (etupainoiset jarrut?)***
- ***Tänä talvena (2013) kylmempiä kuin viime talvena.***
- ***Autossa 21 tarkenee, 23:ssa ei***
- ***Ketterämpi kuin Scala***
- ***Jos moottori on juuri sammumassa, kun täytyy kiihdyttää, järjestelmä ei tiedä, mitä se tekisi***
- ***Pelkkä kaasunnosto ilman jarrun painamista saisi riittää regeneroinnin käynnistymiseen***
- ***Nopeasti kiihdytettäessä vaihtokohta saattaa epäloogisesti aikaistua, ja vaihteisto hyppää vaihteen tai jopa useampia vaihteita yli, vaihteisto on hidas***

Kuljettajien näkemyksiä voi kommentoida esim. siten, että tehontarve on osittain tottumuskysymys. Hybridibussissa on vähemmän tehoa kuin dieselbusseissa yleensä, mutta käytettävissä oleva teho mahdollistaa kuitenkin ne ajotehtävät suunnilleen siinä aikataulussa, jotka autolle on suunniteltu. Turun kaupungin pinnanmuodot ovat kuitenkin melko mäkiset, joten tehon vähäisyys ehkä korostuu Turussa enemmän kuin sellaisissa kaupungeissa, joissa maasto on tasaisempi.

Neljän hybridibussin toiminnassa on Turussa havaittu selviä yksilöeroja. Valmistajan edustajan mukaan kaikki autot ovat samanlaisia, mutta silti eroja käytännön toimivuudessa ja käyttäytymisessä on esiintynyt. Yksi kuljettaja on esim. kommentoinut lämmityslaitteessa ilmenneitä yksilöeroja. Samoin hybridijärjestelmän toimivuudessa ja dieselmoottorin toivotussa sammumisherkkyydessä on ilmennyt eroja eri autoyksilöiden välillä.

Volvon hybridibusseissa on käytetty talvella lisälämmittimiä, koska lämpö ei ole muuten riittänyt. Turussa lämmittimien kanssa on ollut ongelmia. Talvella hybridibussien hyötyjen on nähty pienenevän myös sen vuoksi, että jarrutusenergiaa ei saada talteen liukkauden vuoksi.

8. Kokonaistaloudellinen kannattavuus

Hybridibussin laajan käyttöönoton esteenä on ollut sen dieselbussia selvästi korkeampi hankintahinta. Hybridibussi on ollut jopa yli 50 % kalliimpi kuin vastaava dieselbussi. Tämän eron nähdään kuitenkin pienenevän hybriditekniikan kehittyessä. Clark et al. (2009) arvioivat, että hybridibussi oli 65 % kalliimpi kuin dieselbussi vuonna 2007, mutta vuonna 2012 ero olisi 37 %. Tutkimuksen työpajassa esitettyjen arvioiden mukaanKL:n arvion mukaan hintaero on tällä hetkellä 22–noin 35 %, dieselbussin maksaessa 230 000 € ja hybridibussin 280 000–310 000 €.

Korkeamman hankintahinnan lisäksi kustannuksia aiheuttaa hybridibussien akkujen vaihtotarve. Akkujen hinta ja vaihtoväli riippuu siitä, mitä akkutekniikkaa käytetään. Uusimmat litiumioniakut kestävät arvioiden mukaan noin 6 vuotta ja niiden vaihtaminen maksaa noin 35 000 €. Akkuja on kuitenkin jouduttu vaihtamaan aiemminkin.

Akkujen lisäksi suurempia kuluvia osia autossa ovat moottori ja vaihteisto. Moottorin kustannukset ja vaihtoväli ovat arvioiden mukaan hybridibussille ja dieselbussille samanlaiset. Hybridibussin moottori saattaa kestää pidempään, koska suurimmat rasitukset kiihdytyksissä jäävät pois sähkömoottorin avustuksella. Moottorit kuitenkin tyypillisesti kestävät linja-auton taloudellisen pitoajan eli noin 12 vuotta. Vaihteiston osalta hybridibussin vaihteiston vaihtoväli voi arvioiden mukaan olla hieman lyhyempi (600 000–700 000 km) kuin dieselbussin vaihteiston (n. 800 000 km), mutta hybridibussin vaihteisto on hieman halvempi (5000–6000 €) kuin dieselbussin (9000 €).

Tutkimuksessa mukana olleet hybridibussit ovat kaikki kattavan huoltosopimuksen piirissä. Huoltosopimuksen kesto on tyypillisesti viisi vuotta ja sopimus kattaa kaikki huollot ja korjaukset pieniä huoltotoimenpiteitä, kuten nesteiden lisäämistä ja polttimoiden vaihtoa sekä kolarikorjauksia lukuun ottamatta. Kirjallisuuslähteiden perusteella joissain kaupungeissa hybridibussin huoltokustannukset ovat olleet hieman suuremmat ja joissain kaupungeissa hieman pienemmät. Nylundin ja Koposen (2012) arvion mukaan dieselbussien huoltokustannukset ovat 0,13 €/km ja hybridibussien 0,17 €/km. Tutkimuksessa esitettyjen arvioiden mukaan kustannukset ovat näitä korkeammat. Dieselbussien huoltokustannukset ovat noin 0,20 €/km ja hybridibussien huoltosopimuksen hinta alkaa tasosta 0,10 €/km ja kasvaa viidessä vuodessa noin 0,30 €/km tasolle. Huolloista aiheutuu suorien kustannusten lisäksi myös välillisiä kustannuksia auton ollessa poissa linja-ajosta. Seurannassa mukana olleiden hybridibussien huoltotarve on ollut hieman dieselbusseja suurempi, mutta tämä on johtunut pääosin hybriditekniikasta riippumattomista ongelmista. Clark et al. (2009) mukaan hybridibussin huoltoon tarvitaan myös uusien työvälineiden hankintaa (2500–6000 €), jos huolto tehdään operaattorin toimesta. Valmistajan huoltosopimusta käytettäessä hankintoja ei luonnollisesti tarvitse tehdä.

Hankintahinnan ja huoltokustannusten ollessa hybridibusseilla dieselbusseja suurempia hybridibussin pitäisi säästää polttoainekustannuksissa, jotta sen elinkaarikustannukset olisivat dieselbussia alhaisemmat. Kirjallisuudessa hybridibusseilla on havaittu 10–40 % kulutussäästöjä dieselbusseihin verrattuna ja tässä tutkimuksessa havaitut kulutussäästöt ovat samalla vaihteluvälillä. Sekä kirjallisuudessa tehtyjen havaintojen, että tämän tutkimuksen perusteella hybridibusseilla saavutettava säästö pienenee noin 0,7 % keskinopeuden kasvaessa 1 km/h nopeusalueella 5-30 km/h. Näin ollen hybridibussit tulee sijoittaa mahdollisimman hitaalle linjalle. Saavutettu kulutussäästö riippuu myös olennaisesti hybridibusseilla korvattavien bussien ominaisuuksista. Tutkimuksen perusteella voidaan tehdä tarkastelu hybridibussien elinkaaritaloudellisuudesta havaittujen kulutussäästöjen ja edellisissä kappaleissa mainittujen muiden kustannusten avulla.

Taulukko 9. Investointilaskelman esimerkin lähtöarvot. Taulukossa esitetyillä lukemilla saadaan investointilaskurilla kuvassa 51 esitetyt elinkaarikustannukset (nettonykyarvo, laskentakorkokanta 6 %

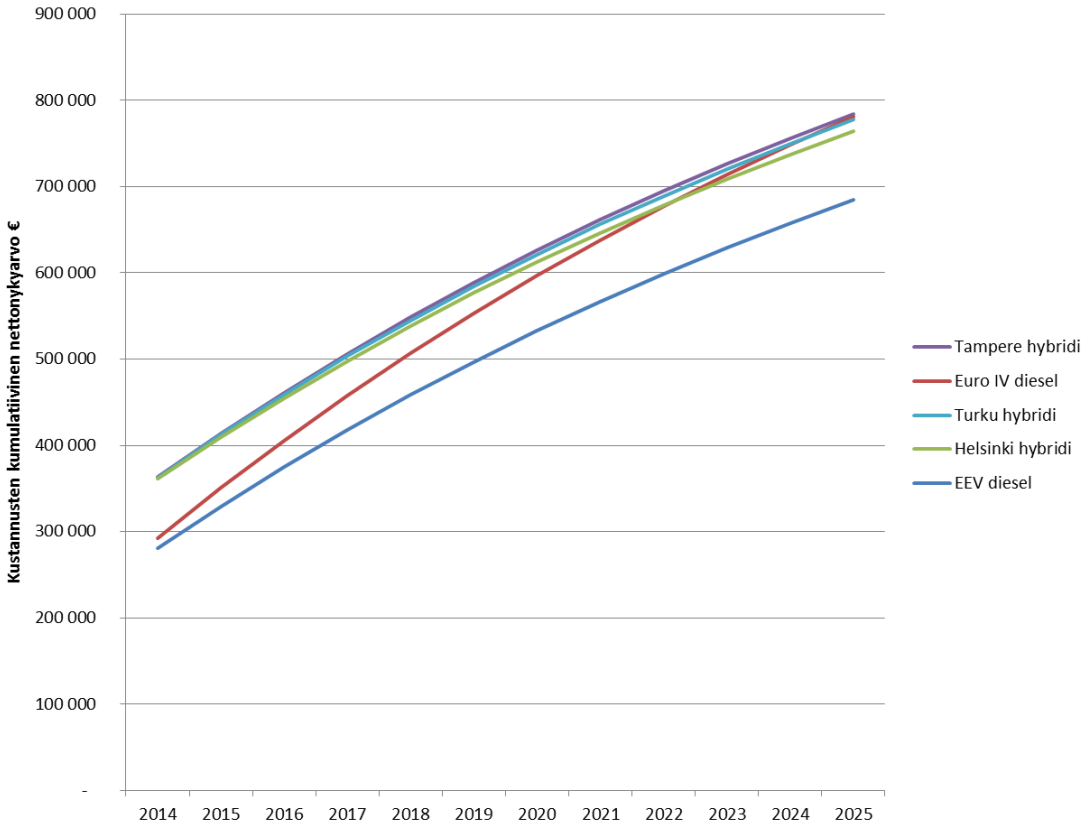
	EEV diesel	Euro IV diesel	Helsinki hybridi	Tampere hybridi	Turku hybridi
Hankintahinta	230 000	230 000	310 000	310 000	310 000
Polttoainekustannukset €/vuosi	34 128	44 974	27 302	29 546	28 798
- kulutus l/100km	36.5	48.1	29.2	31.6	30.8
- hinta €/l	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1
- ajokilometrit/vuosi	85 000	85 000	85 000	85 000	85 000
Huoltokustannukset €/vuosi	17 000	17 000	23 800	23 800	23 800
- kustannukset €/km	0.20	0.20	0.28	0.28	0.28

Tampereen joukkoliikenteessä havaittiin tankattujen polttoainemäärien perusteella hybridien kuluttavan 13 % vähemmän polttoainetta kuin vertailukohtana ollut Volvon EEV-dieselbussi, Helsingissä puolestaan Scanian valmistamien EEV-dieselien kulutus oli samaa luokkaa kuin Volvolla Tampereella ja hybridit kuluttivat noin 20 % vähemmän dieseliä. Linja-auton vuotuisen ajosuoritteen ollessa 85000 km ja dieselin hinnan ollessa 1,1 €/l tämä tarkoittaa vuodessa noin 4500 euron säästöä polttoainekuluissa Tampereella ja 7200 euron säästöä Helsingissä. Vertailukohdaksi voidaan laskea Turussa hybridibusseilla havaittu 36 % kulutussäästö vanhempiin Scanian EURO IV-dieselbusseihin nähden, jolloin polttoainekulut ovat vuodessa noin 16 000 euroa pienemmät hybridibussilla. Polttoaineenkulutuksessa saavutettava säästö määrittääkin suurimmalta osin hybridibussi-investoinnin kannattavuuden dieselbussiin verrattuna.

Kuvasta 51 nähdään, että hybridibussin elinkaarikustannukset huomattavasti suuremmat kuin EEV-dieselbussin, vaikka hybridibussin kulutus olisi Helsingissä havaittujen kulutusten mukaisesti alhaisella tasolla. Hybridibussin suuremmat huoltokustannukset ulosmittaavat polttoainekustannusten säästöt ja elinkaarikustannusten ero pysyy koko ajan hankintahintojen erosta johtuvalla 80 000 euron tasolla. Jos sen sijaan hybridibussin polttoaineenkulutus on Tampereella havaitulla tasolla, kustannusero kasvaa koko elinkaaren ajan EEV-dieselin hyväksi, ollen lopulta lähes 100 000 €. Polttoaineenkulutuksessa saavutettavien säästöjen merkitystä kuvaa, että Turun EURO IV-dieselbussien keskikulutusta vertailukohtana käyttäen hybridibussin elinkaarikustannukset ovat Helsingin hybridikulutusta käyttäen 16 600 € pienemmät kuin dieselbussin ja Tampereen ja Turun hybridibussien kulutusta käyttäen lähes samalla tasolla. Näin ollen hybridibussien sijoittaminen hitaille linjoille, joilla niistä saadaan suurin hyöty, on hyvin tärkeää, mutta sekään ei välttämättä tee hybrideistä kokonaistaloudellisesti kannattavia.

Elinkaarikustannusten laskennassa suuri epävarmuustekijä on polttoaineen hinta. Jos polttoaineen hinta nousee 1,60 euroon litralta, muiden oletusten pysyessä taulukon 9 mukaisina, hybridibussin elinkaarikustannukset ovat Helsingissä 12 vuoden jälkeen 52 000 € suuremmat kuin dieselbussin. Vertailussa Turun dieselbussin mukaiseen polttoaineenkulutukseen Helsingin hybridibussien mukaisella kulutuksella hybridibussin elinkaarikustannus olisi silloin jo 88 000 € pienempi.

Toinen merkittävä epävarmuus hybridibussin elinkaarikustannuksissa liittyy akkujen käyttöikään. Mikäli akut joudutaan viiden vuoden huoltosopimuksen jälkeen vaihtamaan kaksi kertaa, elinkaarikustannukset kasvavat huomattavasti. Hybridibussin elinkaarikustannukset olisivat Helsingin hybridi- ja dieselbussien polttoaineenkulutusta ja 1,10 €/l hintaa käyttäen jo 120 000 € dieselbussia suuremmat.



Kuva 51. Elinkaarikustannusten nykyarvo taulukon 9 lähtöarvoilla.

9. Päätelmät

Hybridibussit ovat kehittyneet paljon viimeisen kymmenen vuoden aikana. Tekniikka on nyt luotettavampaa ja halvempaa kuin aiemmin ja massatuotanto on tekemässä hybridibusseista kilpailukykyisen vaihtoehdon dieselbusseille. Hybridibusseja käyttäneet operaattorit ja tilaajat ovat olleet tyytyväisiä hybridibusseihin ja niiden käyttöönotolla on voitu vähentää haitallisia lähipäästöjä ja melua.

Hybridibussin elinkaarikustannuksiin liittyy suuria epävarmuuksia polttoaineenkulutuksen todellisten säästöjen, polttoaineen hinnan ja akkujen käyttöiän vuoksi. Polttoaineenkulutuksen säästöt ovat ratkaisevan tärkeitä hybridibussi-investoinnin kannattavuudelle, mutta eri puolilla maailmaa tehdyissä hybridibussien käyttökokeiluissa säästöt ovat vaihdelleet kymmeniä prosenttiyksikköjä. Säästöt riippuvat hybridibussin tekniikan lisäksi kuljettajan ajotavasta, joten kuljettajien koulutus hybridibussien optimaaliseen ajotapaan on erittäin tärkeää. Hybridibussit pitää myös sijoittaa hitaille, paljon jarrutuksia ja kiihdytyksiä sisältäville linjoille, joilla niiden ominaisuudet saadaan hyödynnettyä parhaiten. Investointilaskurin perusteella hybridibussi-investointi on elinkaaritaloudellisesti tällä hetkellä todennäköisesti huono ratkaisu. Epävarmuustekijöiden vuoksi asia selviää vain pitkäaikaisen käytön jälkeen. Todellisten hyötyjen ja kustannusten selvittämiseksi hybridibusseja tulee seurata monipuolisesti heti käyttöönotosta lähtien. Hybridibussi-investoinnilla on kuitenkin muita arvoja, kuten haitallisten lähipäästöjen pieneneminen ja joukkoliikenteen imagon parantaminen, jotka voivat tehdä investoinnista yhteiskunnallisesti kannattavan.

Hybridi- ja dieselbussien simuloinnissa havaittiin, että kuljettajan ajotavalla on enemmän vaikutusta dieselbussin polttoaineenkulutuksen kuin hybridibussilla. Sama havainto tehtiin myös Helsingistä kerätyllä datalla eli polttoaineenkulutuksen kuljettajakohtainen hajonta oli hybridibusseilla pienempää. Simuloinnilla voitiin kuitenkin osoittaa, että kaupunkiajossa hybridibussin polttoaineenkulutukseen voi vaikuttaa merkittävästi. Hybridibusseilla taloudellinen ajotapa mahdollistaa myös pidempien, pelkästään sähköllä ajettujen osuuksien määrän. Lisäksi jarrutuksissa takaisin sähköksi regeneroituvan energian määrää voidaan taloudellisella ajotavalla lisätä.

Käyttökokemusten perusteella hybridibussien operointi suomalaisissa kaupungeissa ei poikkea dieselbussien operoinnista, eikä laajemmalle käyttöönotolle ole teknisiä esteitä. Käytössä esiintyneet ongelmat ovat liittyneet hybridibussien muihin komponentteihin kuin itse moottoritekniikkaan. Hybridibussien käyttöönotto on vaivatonta, koska se ei vaadi investointeja varikkoinfrastruktuuriin toisin kuin kaasubussien käyttöönotto. Hybridibusseja käyttäneet operaattorit ovatkin valmiita hankkimaan lisää hybridikalustoa, mikäli hankintahinnan ero dieselbussiin tulee alemmalle tasolle. Joukkoliikenteen tilaajan vaatimuksesta tai ympäristöbonusten kautta hybridibussien yleistyminen voi kuitenkin olla nopeaa.

Lähteet:

BAE Systems 2012. HybriDrive® Lithium-ion Energy Storage System (ESS). [http://www.hybridrive.com/lithium-ion-energy-storage-system.asp].

Brahe matkainfo 2013. [http://turku.seasam.com/nettinaytto/web].

Chandler, K., Walkowicz, K. 2006. King County Metro Transit hybrid articulated buses: final evaluation results. NREL Technical report.

Chandler, K., Walkowicz, K., Eudy, L. 2002. New York City transit diesel hybrid-electric buses: Final results. DOE/NREL transit bus evaluation project.

Clark, N., Zhen, F., Wayne, W. 2009. Assessment of hybrid-electric transit bus technology. TCRP report 132. Transportation Research Board, Washington.

Clark, N., Zhen, F., Wayne, W., Lyons, D 2007. Transit bus life cycle cost and year 2007 emissions estimation. Federal Transit Administration.

Freemeteo 2013. Säähistoria. Päivittäinen arkisto. [http://freemeteo.com/default.asp?pid=155&gid=633679&la=10&sid=29720].

Hallmark, S., Sperry, B., Mudgal, A. 2010. In-use fuel economy and emission benefits of hybrid-electric school buses in Iowa. Iowa State University.

HSL 2011. Pääkaupunkiseudun ensimmäiset hybridibussit vuoden vaihteessa liikenteeseen. [http://www.hsl.fi/fi/mika-onhsl/Uutiset/2011/Sivut/Page_20111207085544.aspx].

HUF 2012. Hybrid User Forum. [http://www.hybriduserforum.eu/].

Jobson, E. 2010. Hybrid technology for buses. [http://www.fleat-eu.org/downloads/Edward%20Jobson.pdf].

Kellaway, M. 2007. Hybrid buses - what their batteries really need to do. Journal of Power Sources Vol. 168, pp. 95-98.

Koskue, M., Talka, M. 2010. Electric and hybrid buses. Finpro. [http://www.finpro.fi/documents/10304/8ebf0d65-0855-4902-8f6d-1d4c5dc23c27].

Lajunen, A. 2013. "Energy-Optimal Velocity Profiles for Electric City Buses," IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (IEEE CASE 2013), 17 – 21 August, 2013, Madison, WI, USA, pp 1 – 6.

Lajunen, A. 2012. "Evaluation of battery requirements for hybrid and electric city buses," EVS26 International Battery, Hybrid, and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium, Los Angeles, CA, USA, 6-9 May 2012, pp. 1 – 10.

Lammert, M. 2008. Long Beach Transit: two-year evaluation of gasoline-electric hybrid transit buses. NREL technical report.

Maanmittauslaitos 2013. Avoimien aineistojen tiedostopalvelu. [https://tiedostopalvelu.maanmittauslaitos.fi/tp/kartta].

Metsäpuro, P., Liimatainen, H., Rauhamäki, H., Mäntynen, J. 2011. Joukkoliikenteen energiatehokkuuden seuranta, raportointi ja kehittäminen. Sektoritutkimuksen neuvottelukunnan julkaisuja 1:2011.

Mutanen, T. 2009. Älykäs linja-auto. Esitys TransEco-tutkimusohjelman seminaarissa 4.11.2009. [http://www.transeco.fi/media/seminaariaineistot/transeco-tutkimusohjelman_aloitusseminaari_4.11.2009].

Nylund N-O., Koponen K, Fuel and Technology Alternatives for Buses, Espoo 2012. VTT Technology 46

Reittiopas 2013, Helsingin Seudun Liikenne. [http://www.reittiopas.fi/].

Repa Reittiopas 2013, Tampereen Joukkoliikenne. [http://reittiopas.tampere.fi/].

Solaris 2013. Hybrid 12 Eaton. [http://www.solarisbus.com/vehicle/eaton].

Sundström, O., Guzella, L. 2009. "A Generic Dynamic Programming Matlab Function," In proc. 18th IEEE International Conference on Control Applications, Saint Petersburg, Russia, 2009.

Transports Canada 2009. Hybrid buses. Urban transportation showcase program. Case studies in sustainable transportation.

TSB-Bussisivut 2013. Solaris Urbino 12,9 Hybrid. [http://koti.mbnet.fi/b10m/tsb/kortti.php?haku=TKL11].

Tekniikka & Talous. 2011. Turkuun Suomen ensimmäiset hybridibussit. http://www.tekniikkatalous.fi/duuniauto/article631853.ece

YLE Turku 2011. Hybridibussi aloittaa liikenteessä ensimmäisenä Turussa. Verkkouutinen 25.5.2011 [http://yle.fi/alueet/turku/2011/05/hybridibussi_aloittaa_liikenteessa_ensimmaisena_turussa_2620002.html].