

VTT Technical Research Centre of Finland

Rakebus projektin vuosiraportti 2018

Söderena, Petri

Published: 06/02/2019

Document Version
Publisher's final version

[Link to publication](#)

Please cite the original version:

Söderena, P. (2019). *Rakebus projektin vuosiraportti 2018*. VTT Technical Research Centre of Finland. VTT Asiakasraportti, No. VTT-CR-00107-19

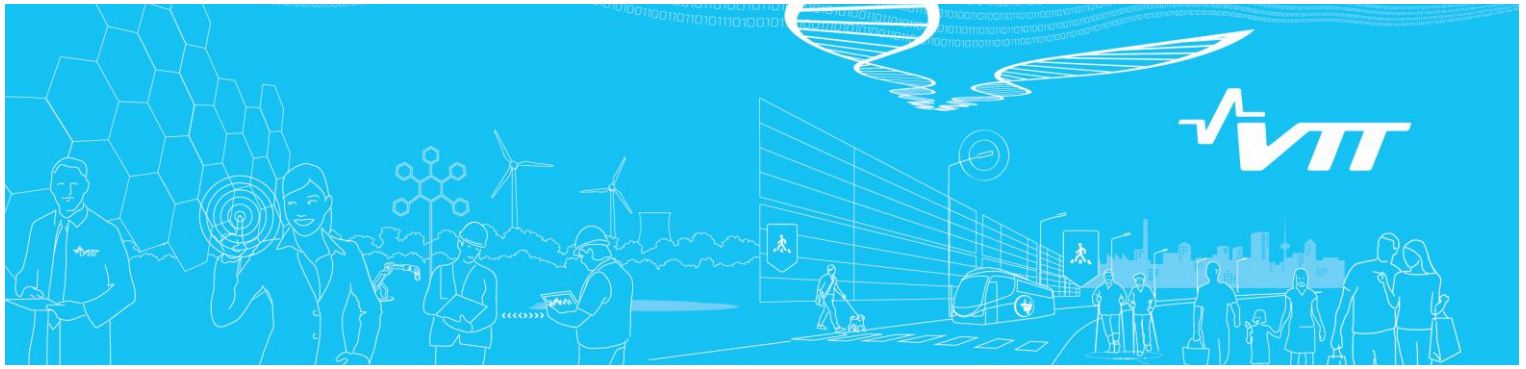


VTT
<http://www.vtt.fi>
P.O. box 1000FI-02044 VTT
Finland

By using VTT's Research Information Portal you are bound by the following Terms & Conditions.

I have read and I understand the following statement:




This document is protected by copyright and other intellectual property rights, and duplication or sale of all or part of any of this document is not permitted, except duplication for research use or educational purposes in electronic or print form. You must obtain permission for any other use. Electronic or print copies may not be offered for sale.



Rakebus projektin vuosiraportti 2018

Kirjoittaja: Petri Söderena

Luottamuksellisuus: Julkinen

Raportin nimi Rakebus - Vuosiraportti 2018		
Asiakkaan nimi, yhteyshenkilö ja yhteystiedot Helsingin seudun liikenne HSL, Reijo Mäkinen	Asiakkaan viite VTT-CRM-156716-18	
Projektin nimi Rakebus 2018 - Kaupunkibussien päästömittaukset	Projektin numero/lyhytnimi Rakebus 2018	
Tilviestelmä <p>Rakebus 2018 -projekti on jatkumoa Helsingin seudun liikenteen (HSL) VTT:ltä tilaamille kaupunkibussien suorituskykyarvioinneille. Projektin tavoitteena oli suorittaa alustadynamometrillä HSL:n tilaaman liikenteen piirissä oleville kaupunkibusseille päästömittauksia autojen päästötason todentamiseksi sekä päivittää HSL-VTT yhteistyössä kehitettyä kaupunkibussien päästötietokantaa. HSL käyttää dataa mm. bussiliikenteen kilpailutukseen. Vastaavanlaisia kaupunkibussien päästötason todentamisprojekteja on suoritettu vuodesta 2002 lähtien.</p> <p>Luotu tietokanta on kattava ja ainutlaatuinen. Vuoden 2018 Rakebus projektin jälkeen kaupunkibussien päästötietokanta pitää sisällään 178 Euro I-VI luokan bussin mittaustuloksen Braunschweig syklillä ja 30 bussin mittaustuloksen WHVC syklillä.</p> <p>Vuonna 2017 otettiin päästötietokannassa käyttöön bussien tulosten jaottelu mittauksissa oleiden bussien ajokilometrien perusteella. Jaottelun johdosta voidaan havaita Euro VI autojen NO_x-päästöjen olevan alle 150 tkm ajettuina todella matalla tasolla. NO_x-päästöt näyttäisivät kuitenkin tämän hetken tilanteen perusteella nousevan merkittävästi ajokilometrien kasvaessa.</p> <p>Vuoden 2018 Rakebus projektin raporttiin lisättiin ns. CF-kerroin (conformity factor) havainnollistamaan mitattujen NO_x-päästöjen perusteella arvioitua suhdetta Euro VI lainsäädännön tyyppihyväksyntä (WHTC) ja käytönaikaisten päästöjen sääntöjen mukaisuustestin (ISC) raja-arvoihin.</p> <p>Tämän hetken tietojen mukaan Euro VI bussien ikääntyminen yli 150 tkm ajetuilla busseilla näkyy siten, että sekä Braunschweig syklillä (kuuma käynnistys) että WHVC syklillä (kylmä- ja kuumakäynnistykseen yhdistelmä) NO_x päästötaso nousee Euro VI päästölainsäädännön raja-arvojen (varsinaiset raja-arvot ja ISC) tasolle tai sen yli.</p>		
Espoo 6.2.2019		
Laatija  Petri Söderena Erikoistutkija	Tarkastaja  Nils-Olof Nylund Senior Advisor	Hyväksyjä  Jukka Lehtomäki Tiimipäällikkö
VTT:n yhteystiedot VTT PL 1000, 02044 VTT Puh. 020 722 111 (vaihde, klo 8.00 - 16.30) Sähköpostiosoitteet: etunimi.sukunimi@vtt.fi		
Jakelu HSL, VTT		
<p style="text-align: center;"><i>VTT:n nimen käyttäminen mainonnassa tai tämän raportin osittainen julkaiseminen on sallittu vain Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy:ltä saadun kirjallisen luvan perusteella.</i></p>		

Luettelo käytetyistä lyhenteistä

CNG	Compressed natural gas	Paineistettu maakaasu
CO	Carbon oxide	Hiilimonoksidi
CO ₂	Carbon dioxide	Hiilidioksidi
CVS	Constant volume sampler	Pakokaasukeräin (vakiovirtaus)
DOC	Diesel oxidate catalyst	Diesel hapetuskatalysaattori
DPF	Diesel particulate filter	Diesel hiukkassuodatin
EEV	Enhanced Environmentally Friendly Vehicle	Euro V ympäristöystävällisempi päivitys
HC	Hydrocarbon	Hiilivety
EAT	Exhaust aftertreatment	Pakokaasujen jälkikäsittely
EGR	Exhaust gas recirculation	Pakokaasujen takaisinkierätyk
NO _x	Nitrogen oxides	Typpioksidit
SCR	Selective catalyst reduction	Selektiivinen katalyyttinen pelkistäminen
SI	Spark ignition	Kipinäsytytteinen (kaasumoottori)
PM	Particulate mass	Partikkelimassa
PN	Particulate number	Partikkelilukumäärä
WHTC	World harmonized transient cycle	Moottorien sertifiointisykli
WHVC	World harmonized vehicle cycle	WHTC:aa vastaava ajoneuvosykli

Sisällysluettelo

Luettelo käytetyistä lyhenteistä	2
Sisällysluettelo.....	3
1. Toimeksiannon tausta	4
2. Johdanto	5
3. Mittausmenetelmä.....	7
3.1 Mittausjärjestelmä	7
3.2 Mittausyhdöt	8
3.3 Mittausjärjestelyt	10
4. Tulokset	11
5. Tulosten tarkastelu.....	15
6. Yhteenveto.....	17

1. Toimeksiannon tausta

Rakebus 2018 -projekti oli HSL:n (Helsingin seudun liikenne -kuntayhtymä) VTT Oy:ltä tilaama kaupunkibussien päästömittauksia koskeva vuoden 2018 kestänyt projekti, joka oli jatkoa ns. Rakebus bussien päästömittaus -projekteille, joita on toteutettu useiden vuosien ajan 2000-luvun alusta lähtien.

Projektin tuloksena HSL saa käyttöönsä VTT:n kaupunkibussien päästötietokannan, jota ylläpidetään jatkuvasti, ja jota on nyt päättyneen projektin tuloksena päivitetty vuosineljänneksittäin vuonna 2018 mitattujen bussien osalta. HSL hyödyntää syntyvää dataa mm. bussiliikenteen kilpailutuksessa ja strategiatyössä.

Asiakas on päättänyt, että bussien päästötietokanta on julkinen.

2. Johdanto

VTT Oy:n ylläpitämää kaupunkibussien päästötietokantaa on koottu vuodesta 2002 lähtien, ja se kattaa tällä hetkellä yhteensä 178 kaupunkibussia (dieselbusseja Euro I - VI - luokissa, kaasubusseja Euro II - VI luokissa sekä EEV luokan etanolibusseja) Braunschweig-syklillä mitattuna. Vuoden 2018 aikana tietokantaan lisättiin 14:sta kaupunkibussin mittaustulokset. Tietokanta pitää sisällään Euro luokkakohtaiset sekä automerkkikohtaiset keskiarvotulokset. Mittaustulokset perustuvat akkreditoituun mittausmenetelmään ja ovat keskenään täysin vertailukelpoisia, mikä tekee tietokannasta laajuudeltaan poikkeuksellisen kattavan ja ainutlaatuisen jopa maailmanlaajuisesti.

Vuonna 2017 mittauksissa otettiin käyttöön lämmenneellä moottorilla ajettavan Braunschweig-syklin rinnalla myös WHVC¹ testisykli, joka ajetaan kylmä- ja kuumakäynnisteisen syklin yhdistelmänä. Lopullinen tulos ilmoitetaan yhdistelmänä kylmän syklin (14%) ja kuumen syklin (86%) tuloksista. Kylmäkäynnisteinen testi lisättiin, koska se tuo hyvin esiin uusimpien autojen herkkyyden lämpötilalle. Tällä hetkellä päästötietokanta sisältää myös 30 kaupunkibussin päästötulokset WHVC sykliillä.

Päästötietokanta päivittyy jatkuvasti uusien ajoneuvojen sekä seurannassa olevien ajoneuvojen mittausten myötä. Ajoneuvojen seurannan kautta voidaan arvioida myös kilometrikertymän vaikutusta ajoneuvojen suorituskyvyn ja päästötason pysyvyyteen.

Kaupunkibussien päästö- ja energiankulutustutkimusta on VTT:llä toteutettu useassa projektikonaisuudessa. Projektit kattavat sekä bussien lisäksi myös kuorma-autokalustoon kohdistuvia hankkeita.

Kertyneiden mittausten myötä on muodostunut selvä kuva ajoneuvojen teknisestä kehityksestä päästöjen ja energian käytön osalta. Koska mittausten taustalla olevat hankkeet ovat olleet pääsääntöisesti julkisesti rahoitettuja, tämä tieto on siten myös pääosiltaan julkisesti saatavilla ja käytettävissä projektijulkaisujen muodossa.

Kaupunkibussien päästötutkimus ja menetelmän kehitys aloitettiin VTT:llä laajemmin vuonna 2002 uuden raskaan kaluston tutkimuslaboratorion valmistuttua. Ensimmäiseen vuodet 2002-2004 käsittäneeseen *Bussikaluston pakokaasupäästöjen evaluointi* (RAKEBUS) -projektiin osallistuivat seuraavat tahot:

- Pääkaupunkiseudun Yhteistyövaltuuskunta YTV
- Helsingin Kaupungin Liikennelaitos, Suunnitteluyksikkö²
- Liikenne- ja viestintäministeriö
- Gasum Oy
- Vägverket (Ruotsi)
- The International Association for Natural Gas Vehicles (Uusi-Seelanti)
- VTT

RAKEBUS-projektissa yhtenä keskeisenä tavoitteena oli selvittää erityyppisten kaupunkibussien päästöt todellisuutta vastaavassa dynaamisessa ajossa. Tuolloin jo varauduttiin siihen, että pakokaasujen jälkikäsittelytekniikka lisääntyy merkittävästi. Kaupunkibussien, kuten muidenkin raskaiden autojen, moottorit hyväksytään moottorikokeen perusteella irrallisina, ottamatta huomioon ajoneuvon muita ominaisuuksia, joten tyyppihyväksymistien tulokset eivät ole sellaisenaan sovellettavissa todellisen liikenteen päästöjen arvioimiseen. Tyyppihyväksymiskokeessa ei myöskään mitata hiilidioksidipäästöjä eikä polttoaineen (tai energian) kulutusta.

Projektikonaisuudet, joissa bussitutkimusta on aikaisemmin toteutettu, ml. internet-osoitteet lisätiedonhauille:

¹ WHVC = World Harmonized Vehicle Cycle

² Pääkaupunkiseudun Yhteistyövaltuuskunnasta YTV:stä ja ja Helsingin kaupungin liikennelaitoksen suunnittelu-yksiköstä muodostettiin vuonna 2010 HSL.

RAKEBUS 2002 – 2005

<http://www.vtt.fi/inf/julkaisut/muut/2005/RAKEBUS.pdf>
<http://www.vtt.fi/inf/julkaisut/muut/2007/RakeBus2005.pdf>
<http://www.vtt.fi/inf/julkaisut/muut/2007/RakeBus2006.pdf>

RASTU³ 2006 – 2008

http://www.motiva.fi/files/2278/RASTU-loppuraportti_2006-2008.pdf

HDENIQ⁴ 2009 – 2011

<http://www.transec.fi/julkaisut/hdeniq-hanke>

http://www.transec.fi/files/341/VTT_Kaupunkibussien_Paastotietokanta_2010.pdf

http://www.transec.fi/files/556/Kaupunkibussien_paastotietokanta_2011_Yhteenveto_VTTn_menetelmista_ja_mittauksista.pdf

Hyötyajoneuvot 2012

Erkkilä, K., Laurikko, J. & Karvonen, V. Kaupunkibussien päästötietokanta 2012 – Yhteenveto VTT:n menetelmistä ja mittauksista. Report VTT-CR-00455-14, 2014. In Finnish.

RAKEBUS 2013

Karvonen, V. 2013. Kaupunkibussien päästötietokanta 2013 – Yhteenveto VTT:n menetelmistä ja mittauksista. VTT-R-05385-14. 13 s.

http://www.transsmart.fi/files/223/Kaupunkibussien_paastotietokanta_2013.pdf

RAKEBUS 2016

Söderena, P. 2017. Rakebus 2016 – Projektin loppuraportti. VTT-CR-00462-17. 20 s.

http://www.transsmart.fi/files/427/Rakebus_2016_projektin_loppuraportti_20170313.pdf

RAKEBUS 2017

Söderena, P. 2017. Rakebus 2017 – Projektin loppuraportti. VTT-CRM-114458-17. 16 s.

http://www.transsmart.fi/files/439/Rakebus_2017_Projektin_loppuraportti.pdf



³ Raskas ajoneuvokalusto: Turvallisuus, ympäristöominaisuudet ja uusi tekniikka 2006-2008

⁴ Energiatehokas ja älykäs raskas ajoneuvo

3. Mittausmenetelmä

3.1 Mittausjärjestelmä

VTT:n raskaiden ajoneuvojen tutkimuslaboratoriossa (Kuva 1) on alustadynamometrin, moottoridynamometrin ja täyden virtaaman keräys- ja laimennuslaitteiston (CVS) lisäksi monipuolinen analyysilaitteisto sekä säänneltyjen päästöjen (CO, HC, NO_x, PM ja PN) että sääntelemättömien päästöjen erikoispakokaasumittauksiin, mukaan lukien laitteistot hiukkasten yksityiskohtaiseen karakterisointiin (mm. massaemissio, kokoluokittelu, lukumäärälaskenta).

FroudeConsinen valmistaman alustadynamometrin rullan halkaisija on 2,5 metriä, ja sen tehon vastaanottokyky (jatkuva) on 300 kW. Dynamometri on varustettu erittäin nopealla säätöjärjestelmällä ja sähköisellä inertian simuloinnilla mahdollistaen dynaamisen testauksen (transientitestausta). Inertian simulointi on säädettävissä alueella 2.500 – 60.000 kg, eli laitteistolla kyetään jäljittelemään jopa maksimiin kuormattua ajoneuvoyhdistelmää, jonka kokonaismassa on 60 tonnia.

Säännellyt pakokaasukomponentit mitataan Direktiivin 1999/96/EC vaatimukset täyttävän täyden virtaaman CVS –laitteiston (alun perin Pierburg CVS-120-WT ja sittemmin osittain AVL laitteilla päivitetty) ja analysaattorijärjestelmän (AMA i60) avulla. Päästöistä kerätään osavirtanäyte koko kokeen (tai osasyklin) ajalta näytepussiin henkilöautojen testin tapaan, josta muodostetaan yksittäisen kokeen keskiarvotulos. Lisäksi pakokaasuista määritetään hetkelliset massaemissiot. Saatua hetkellisestä massaemissioista integroitua tulosta voidaan verrata näytepusseista saatuun keskiarvotulokseen.



Kuva 1. Yleisnäkymä ajoneuvolaboratoriosta. Ylhäällä oikealla näkyy CVS-laitteiston laimennustunneli. Laboratorion lämpötila vakioidaan mahdollisimman tarkan toistettavuuden saavuttamiseksi.

3.2 Mittaus sykli

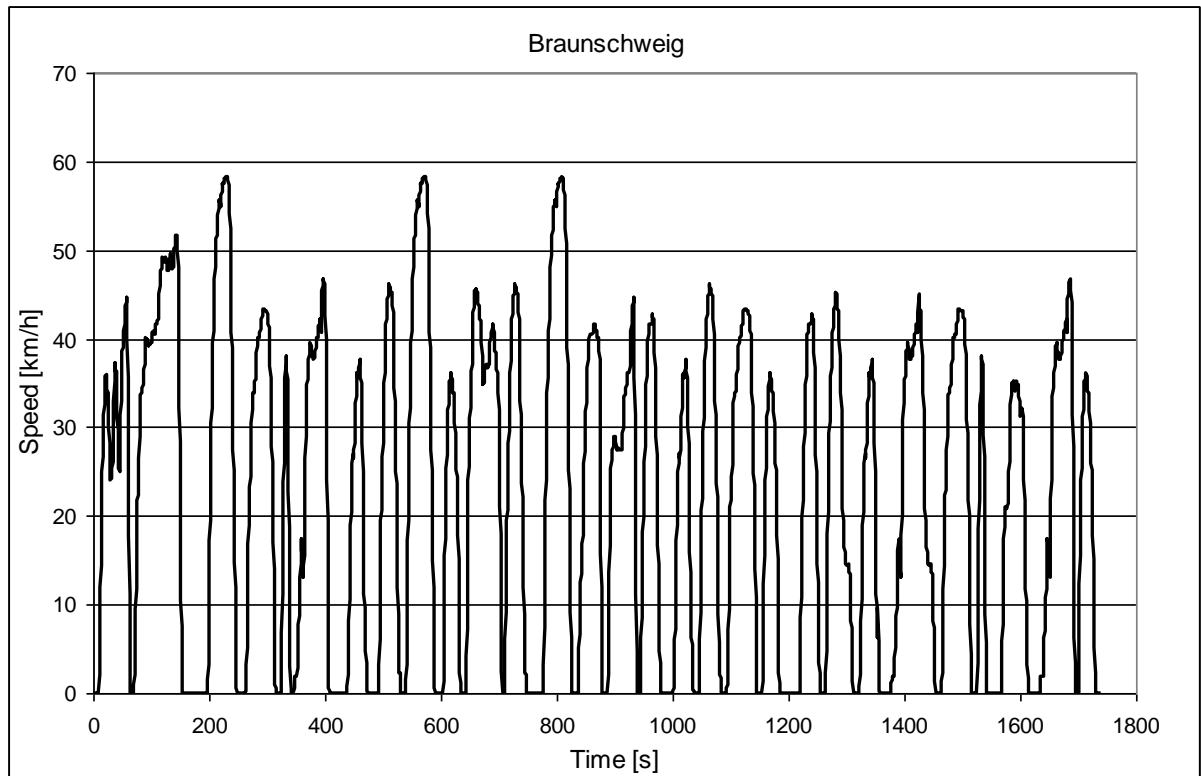
Päästötietokanta koostuu akkreditoitun mittausmenetelmän mukaan alustadynamometrillä ajettujen testien tuloksista⁵. Alustadynamometrillä ajetaan tutkimusmenetelmän mukaisesti Braunschweig -kaupunkibussisykli sekä ja WHVC kylmä-kuuma yhdistelmäsykli käyttäen inertia-asetuksena ajoneuvon (punnittua) omamassaa lisättyä hyötykuormalla, joka on puolet enimmäiskuormasta.

Alusta asti mukana olleena mittaus syklinä käytetty Braunschweig-sykli on saksalaisperäinen, Braunschweigin kaupungin bussiliikenteestä aikoinaan kerätty sykli, mutta sittemmin yleisesti tunnettu ja laajalti käytetty varsinkin kaupunkiliikenteen bussien mittaamisessa. Sykli on tallennus ajoneuvon nopeudesta ajan suhteen (Kuva 2), ja se kuvaa vertailumittausten mukaan hyvin myös Helsingin keskustan tyyppistä ajoa. Todellisesta ajosuoritteesta tallennettu nopeus/aika-profiili toistetaan kaikilla tutkimuksen ajoneuvoilla. Toisin sanoen kaikilla ajoneuvoilla toteutetaan samanlainen ajosuorite. Tämä on keskeisen tärkeää tulosten vertailukelpoisuuden saavuttamiseksi. Erityyppisillä ajosuoritteilla ajoneuvojen suorituskky ei ole vertailukelpoinen. VTT:n menetelmässä Braunschweig-testisyklillä ajettaessa ajoneuvo sekä dynamometri lämmitetään ennen mittauksia normaaliin käyttölämpötilaan ajamalla puoli tuntia nopeudella 80 km/h. Tämän jälkeen ajoneuvon tila vakioidaan ajamalla yksi kokonainen mittasykli, esim. Braunschweig-sykli (1740 s). Vakioinnin jälkeen suoritetaan kaksi peräkkäistä testiajoa, joiden tuloksien keskiarvo on varsinainen ilmoitettava tulos. Mittaus tapahtuu normaalissa huoneenlämmössä.

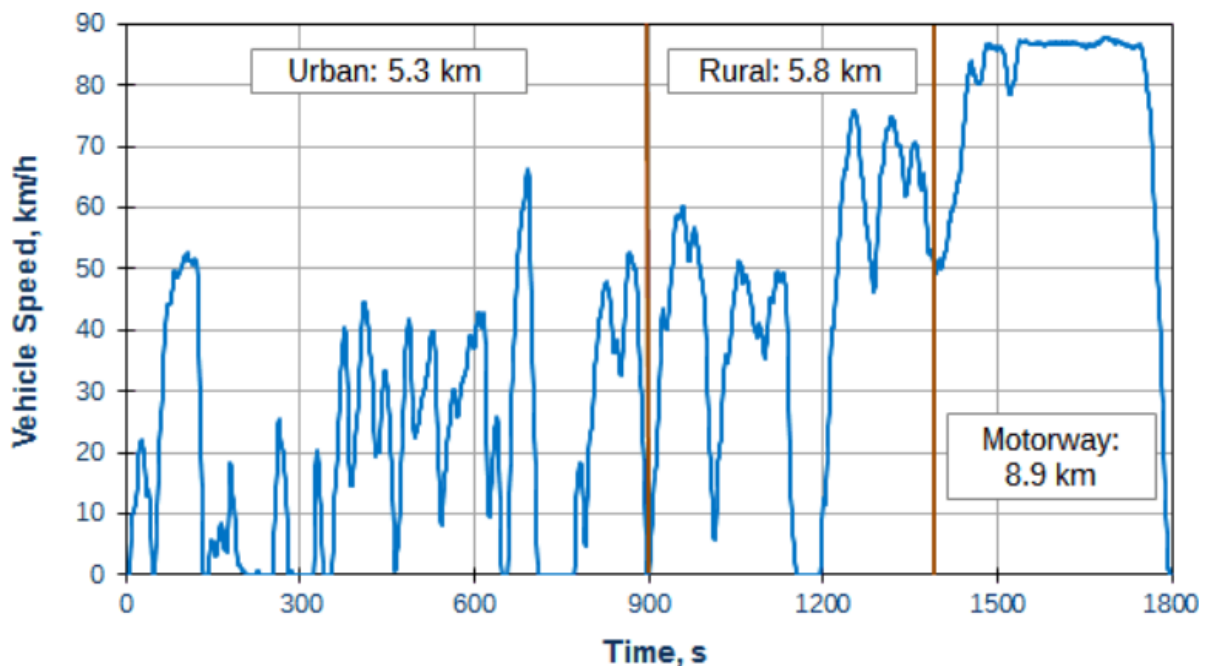
Vuonna 2017 otettiin käyttöön Braunschweig-kaupunkibussisyklin lisäksi WHVC-testisykli, joka suoritetaan kylmä- ja kuumasyklin yhdistelmänä. WHVC-testisykli päätettiin ottaa mukaan, jotta dynamometrimittausten tuloksille saadaan parempi vertailtavuus Euro VI-moottoreiden sertifiointisykliin WHTC. Moottorin päästöt mitataan WHTC-syklissä sekä kylmäkäynnisteisenä moottori yön yli seisoneena, että lämminkäynnisteisenä. Kylmäkokeen jälkeen pidetään 10±1 minuutin tauko, jonka jälkeen aloitetaan lämmin koe. Moottorin päästöarvot lasketaan näiden kahden tuloksen perusteella, kylmäkokeen painoarvon ollessa 14 % ja lämpimän 86 %. Kaupunkipussien päästötietokantaan suoritettavissa WHVC kylmä-kuumayhdistelmäsykleissä käytetään samaa mittausmenettelyä kokonaiselle ajoneuvolle. WHVC-sykli ei ole nimenomainen kaupunkibussisykli, vaan testisyklillä on tarkoitus jäljitellä ajoneuvon käyttöä kaupunki-, maantie- ja moottoriteliikenteessä. Kullekin liikennetyypille on oma jakso syklissä. Kuva 3 on esitetty WHVC-testisyklin eri jaksot ja niiden nopeusprofiilit.

WHVC-testauksessa inertia-asetuksena käytetään Braunschweig-testisyklin tapaan hyötykuormaltaan puolikuormaa vastaavaa massaa. Molempien testisykliä aikana kertyneet ympäristöpäästöt ja polttoaineenkulutus ilmoitetaan massoina ajomatkaan suhteutettuna [g/km], [kg/km] ja energiankulutus ilmoitetaan myös muodossa [MJ/km].

⁵ FINAS:n VTT:lle myöntämän nykyinen akkreditointitunnus on FINAS T259.



Kuva 2. Braunschweig kaupunkibussisyklin nopeus – aika profiili.



Kuva 3: WHVC testisyklin nopeus - aika profiili ja eri liikennetyyppejä vastaavat jaksot.

Euro VI-autojen osalta on muodostettu neljä tulostaulukkoa. Nämä ovat vanhan menetelmän mukaiset tulostaulukot Braunschweig-testin tuloksille ja uudet taulukot WHVC-testin tuloksille. Kummankin syklin osalta esitetään Euro-luokkien keskiarvotulokset ja lisäksi merkkikohtaiset keskiarvotulokset.

3.3 Mittausjärjestelyt

VTT käyttää kaupunkibussien seurantamittauksissa tavallista jakeluasemilta saatavaa kauppalaatuista, kevät-, kesä- ja syyskäyttöön tarkoitettua (-5/-15) dieselpolttoainetta (Neste dieselpolttoaine). Polttoaine-erät hankitaan VTT:lle noin kaksi kertaa vuodessa ja niistä otetaan kontrollinäytteet, jotka arkistoidaan.

Ajoneuvon polttoaineen kulutus testin aikana mitataan ulkoisesta polttoainesäiliöstä punnitsemalla. Hiilidioksidipäästöjen määrittämisessä käytetään pakokaasuanalysaattoreiden tuottaman pitoisuustiedon sijasta punnittuun polttoaineenkulutukseen perustuvaa laskentaa paremman mittatarkkuuden vuoksi.

Polttoainetiedot (tiheys, ominais-CO₂ arvo ja lämpöarvo) perustuvat dieselin ja maakaasun osalta Euroopan Komission yhteisen tutkimuslaitoksen (JRC) raporttiin EUR 26028 EN – 2014 Well-to-Wheels analysis of Future Automotive Fuels and Powertrains in the European Context (https://iet.jrc.ec.europa.eu/about-iec/sites/iet.jrc.ec.europa.eu/about-iec/files/documents/report_2014/wtt_report_v4a.pdf).

Etanolidieselin (lisäaineistettu etanoli ED95/RED95) osalta laskentaperusteena on käytetty etanolin hiilipitoisuutta ja polttoaineen lämpöarvoa.

Kaupunkibussien ajovastuksina käytetään vastuksia, jotka on määritetty kullekin ajoneuvoluokalle (12 metriä/2-akselinen, 14 metriä/3-akselinen) rullauskokeilla käyttäen kuormana puolta nimelliskuormasta. Puolikuorma antaa kuvan ajoneuvojen keskimääräisestä suorituskyvystä. Kuorman vaikutus runsaasti kiihdytyksiä ja jarrutuksia sisältävässä Braunschweig-syklissä on merkittävä, sillä ajoneuvon massan kiihdyttämiseen käytetään n. 70 % vetopyörälle tuodusta energiasta. Tyypillisesti siis vetopyörälle tuodusta työstä n. 20 % kuluu vierintävastuksen voittamiseen, n. 10 % ilmanvastuksen voittamiseen ja loput n. 70 % käytetään massan kiihdyttämiseen.

Bussit mitataan siinä kunnossa kun ne ovat VTT:lle liikennöitsijöiltä tullessaan olleet. Mahdolliset virheilmoitukset tai moottorin virheellinen toiminta eivät estä mittauksia. Perusteluna tälle on, että ylläpidettävän tietokannan halutaan kuvaavan mahdollisimman hyvin tilannetta, joka vastaa liikenteessä olevien bussien kuntoa ja siten vallitsevaa todellisuutta.

4. Tulokset

VTT:n kaupunkibussien päästötietokannan tiivistelmät koostuvat neljästä taulukosta: Taulukko 1 - Taulukko 4. Taulukko 1:ssä on esitetty kootusti kaupunkibussien keskimääräiset päästöt Braunschweig -syklillä ajoneuvon rakenteen ja polttoaineen perusteella jaoteltuna. Jaottelussa ovat mukana myös hybridi- sekä kevytrakenneteknologiaa käyttävät kaupunkibussit. Taulukko 2:ssa on esitetty kaupunkibussien päästöt merkkikohtaisesti polttoaineen ja ajoneuvon tyyhin mukaan jaoteltuna.

Vuonna 2017 käyttöön otetun WHVC-syklin tulokset ovat esitetty Taulukko 3 - Taulukko 4:ssä. Taulukko 3:ssa on esitetty Euro VI- ja retrofit Euro VI⁶-kaupunkibussien keskimääräiset päästöt WHVC-syklillä. Taulukko 4:ssa on esitetty merkkikohtaiset päästöt Euro VI-kaupunkibusseille WHVC syklillä.

Molempien syklien tulokset ovat keskimääräisiä koostuen useamman eri ajoneuvon päästötuloksien keskiarvosta. Vuonna 2017 myös päästötietokantataulukon esitystapaan tehtiin muutoksia. Tulokset on nyt jaoteltu EEV- ja Euro VI-bussien osalta ajokilometrien perusteella kolmeen luokkaan: luokka 1. alle 150 tkm, luokka 2. 151 tkm ... 500 tkm ja luokka 3. yli 501 tkm. Käyttöön otetun jaottelun perusteena on, että bussit ajomäärän mukaan jaottelemalla saadaan esiin mahdollinen pakokaasujen jälkikäsitteilylaitteiston toiminnan huononemisesta johtuva päästöjen kasvu ajokilometrien karttuessa. Lisäksi NO_x-päästöjen keskihajonnalle on otettu EEV- ja Euro VI-päästötason busseille käyttöön oma sarake, jotta keskiarvotulokseen mahdollisesti vaikuttavien yksittäisten bussien suurten poikkeamien vaikutus olisi lukijalle näkyvissä. Mikäli NO_x-päästöjen keskihajonta sarakkeesta puuttuu arvo, se tarkoittaa, että mitattuja autoyksilöitä on vain yksi.

⁶ Retrofit Euro VI-kaupunkibussilla tarkoitetaan bussia, johon on jälkikäteen asennettu pakokaasujen jälkikäsitteilyjärjestelmä, jolla ajoneuvon päästöt täyttävät Euro VI vaatimustason.

Taulukko 3: Taulukko 3: Euro VI ja Euro VI retrofit diesel kaupunkibussien keskimääräiset päästöt WHVC-syklillä rakenteen mukaan jaoteltuna.

WHVC	Number n	Mileage Min	Max	CO g/km	HC g/km	CH ₄ g/km	NO _x g/km	NO _x g/km std.	PM g/km	CO ₂ g/km	CO ₂ eqv** g/km	FC kg/100k m	FC MJ/km
2 - Combined cold and warm start *													
Diesel Euro VI	1	0	150000	0.06	0.00		2.44	0.00	0.011	790	790	25.0	10.8
Diesel Euro VI	11	150001	500000	0.11	0.00		0.57	0.27	0.009	730	730	23.1	10.0
Diesel Euro VI	0	500001	-										
Diesel Euro VI***	1	0	150000	0.17	0.00		0.10	0.00	0.022	691	691	21.9	9.4
Diesel Euro VI***	3	150001	500000	0.06	0.00	0.00	0.27	0.15	0.020	680	680	21.5	9.3
3 - Combined cold and warm start *													
Diesel EEV Retro E VI	4	297433	392436	0.03	0.01		1.06	0.24	0.006	945	945	29.9	12.9
Diesel Euro VI	3	0	150000	0.09	0.01		0.38	0.26	0.009	845	845	26.7	11.5
Diesel Euro VI	7	150001	500000	0.18	0.01		1.32	0.04	0.010	883	883	27.9	11.9
Diesel Euro VI	0	500001	-										
* Weighted average cold (14 %) and warm (86 %) start results													
** CO ₂ eqv = CO ₂ + 23 * CH ₄													
*** Lightweight													

Taulukko 4: Euro VI ja Euro VI retrofit diesel kaupunkibussien merkkikohtainen päästötaulukko WHVC-syklillä päästöluokan sekä ajoneuvon tyyppin mukaan jaoteltuna.

WHVC	Maker	Number n	Level	Fuel	Type	Exht.	CO [g/km]	HC [g/km]	CH ₄ [g/km]	NO _x [g/km]	NO _x [g/km] std.	PM [g/km]	CO ₂ [g/km]	CO ₂ eqv. **	FC [kg/100 km]	FC [MJ/km]	UC [kg/100 km]
2 - Combined cold and warm start *																	
	Iveco	3	Euro VI	Diesel	2 - axle	DOC+DPF+SCR	0.22	0.00		0.48	0.51	0.004	726	726	23.0	9.9	
	MB	3	Euro VI	Diesel	2 - axle	DOC+DPF+SCR	0.04	0.00		0.54	0.11	0.007	708	708	22.4	9.7	
	Scania	3	Euro VI	Diesel	2 - axle	DOC+DPF+SCR	0.01	0.00		1.10	0.95	0.008	776	776	24.6	10.6	
	VDL	1	Euro VI	Diesel	2 - axle	DOC+DPF+SCR	0.17	0.00		0.44		0.025	756	756	23.9	10.3	2.80
	VDL***	4	Euro VI	Diesel	2 - axle	DOC+DPF+SCR	0.09	0.00		0.23	0.15	0.020	683	683	21.6	9.3	1.83
	Volvo	2	Euro VI	Diesel	2 - axle	DOC+DPF+SCR	0.13	0.00		0.35	0.08	0.004	697	697	22.0	9.5	1.30
3 - Combined cold and warm start *																	
	Scania retro E VI	3	Euro VI	Diesel	3 - axle	DOC+DPF+SCR	0.01	0.01		1.30	0.01	0.008	917	917	29.0	12.5	0.84
	Scania	4	Euro VI	Diesel	3 - axle	DOC+DPF+SCR	0.08	0.00		1.27	1.59	0.010	925	925	29.3	12.6	
	Solaris	1	Euro VI	Diesel	3 - axle	DOC+DPF+SCR	0.04	0.01		0.11		0.013	841	841	26.6	11.5	1.78
	VDL	1	Euro VI	Diesel	3 - axle	DOC+DPF+SCR	0.06	0.01		1.33		0.009	904	904	28.6	12.3	3.36
	Volvo retro E VI	1	Euro VI	Diesel	3 - axle	DOC+DPF+SCR	0.04	0.00		0.83		0.004	972	972	30.8	13.3	2.44
	Volvo	4	Euro VI	Diesel	3 - axle	DOC+DPF+SCR	0.28	0.00		1.01	0.74	0.007	834	834	26.4	11.6	1.16
* Weighted average cold (14 %) and warm (86 %) start results																	
** CO ₂ eqv = CO ₂ + 23 * CH ₄																	
*** Lightweight																	

5. Tulosten tarkastelu

Taulukko 1:n Euro VI-päästöluokan dieselbussien tuloksista (Braunschweig) voidaan huomata, että päästötaso on laskenut selvästi Euro V-luokan päästötasosta niin CO-, NO_x- kuin PM-päästöjen osalta. Euro VI-päästöluokan myötä ajoneuvoissa DPF+SCR -yhdistelmä on käytännössä tullut pakolliseksi pakokaasujen jälkikäsittelemiseksi, jotta lainsäädännön päästövaatimukset täyttyvät, sillä muulla tekniikalla niin vähäisiin päästöihin ei enää päästä. Kaikissa kolmessa päästökomponenteissa mitattu alenema on selkeästi suurempi kuin mitä raja-arvojen muutoksesta suoraan laskeminen antaa.

Myös Euro VI CNG-bussien osalta CO-, NO_x- ja HC-päästöt ovat laskeneet merkittävästi Euro V/EEV -luokkien busseihin verrattuna. CNG-bussien hiukkasmassapäästöissä (PM) ei sen sijaan ole tapahtunut merkittävää muutosta Euro II - VI -luokkien välillä. Tämä selittyy yksinkertaisesti sillä, että homogeenisen seoksen (sekä stoikiometrisen että laiha-seos) kipinäsytytys palamismenetelmänä tuottaa maakaasua poltettaessa hyvin vähän hiukkasia.

Vuonna 2017 otettiin käyttöön mittaustulosten jaottelu ajokilometrien mukaan. Taulukko 1 ja Taulukko 3:n tulosten perusteella nähdään, että Euro VI autoilla NO_x päästöt ovat uusina (alle 150 tkm ajettuina) todella matalalla tasolla. Tulokset sekä Braunschweig- että WHVC- syklin osalta ovat luokkaa 0,1 g/km 2-akselisten ja 0,4 g/km 3-akselisten autojen osalta. Mittaukset osoittavat kuitenkin, että NO_x-päästöt nousevat selkeästi ajokilometrien karttuessa. 151 tkm...500 tkm ajetuilla busseilla NO_x-päästöt ovat 2-akselisten bussien osalta nousseet Braunschweig syklillä jo arvoon 1,1 g/km ja WHVC syklillä arvoon 0,6 g/km. Vastaavasti 3-akselisten 151 tkm...500 tkm ajettujen bussien osalta NO_x-päästöt ovat nousseet Braunschweig syklillä arvoon 2,1 g/km ja WHVC syklillä arvoon 1,3 g/km. Keskimääräisten arvojen nousun lisäksi päästöarvojen hajonta näyttäisi myös kasvavan bussien ajokilometrien lisääntyessä.

Muiden päästökomponenttien osalta ei vastaavanlaista päästötasojen kasvua ole havaittavissa. Itse asiassa hiukkasmassapäästöjen (PM) osalta keskimääräiset päästötasot jopa hieman laskevat ajokilometrien kasvaessa. Energiankulutus näyttäisi nousevan hiukan ajokilometrien kasvaessa, syklistä ja akselien määrästä riippuen luokkaa 1.3 ... 3.5 %.

Tällä kertaa arvioitiin myös Braunschweig- ja WHVC- sykleissä mitattuja NO_x päästöarvoja suhteessa raskaiden ajoneuvojen Euro VI moottoreiden lainsäädännön raja-arvoihin. Vertailu ei ole absoluuttisen tarkka, sillä tyyppihyväksymistestit tehdään pelkällä moottorilla. Alustadynamometrimittausten tulokset on laskettu moottorin kampiakselille olettamalla voimansiirron hyötysuhteeksi 75 %⁷, luku joka perustuu mittauksilla arvioituun voimansiirron hyötysuhteeseen WHVC ja Braunschweig sykleillä.

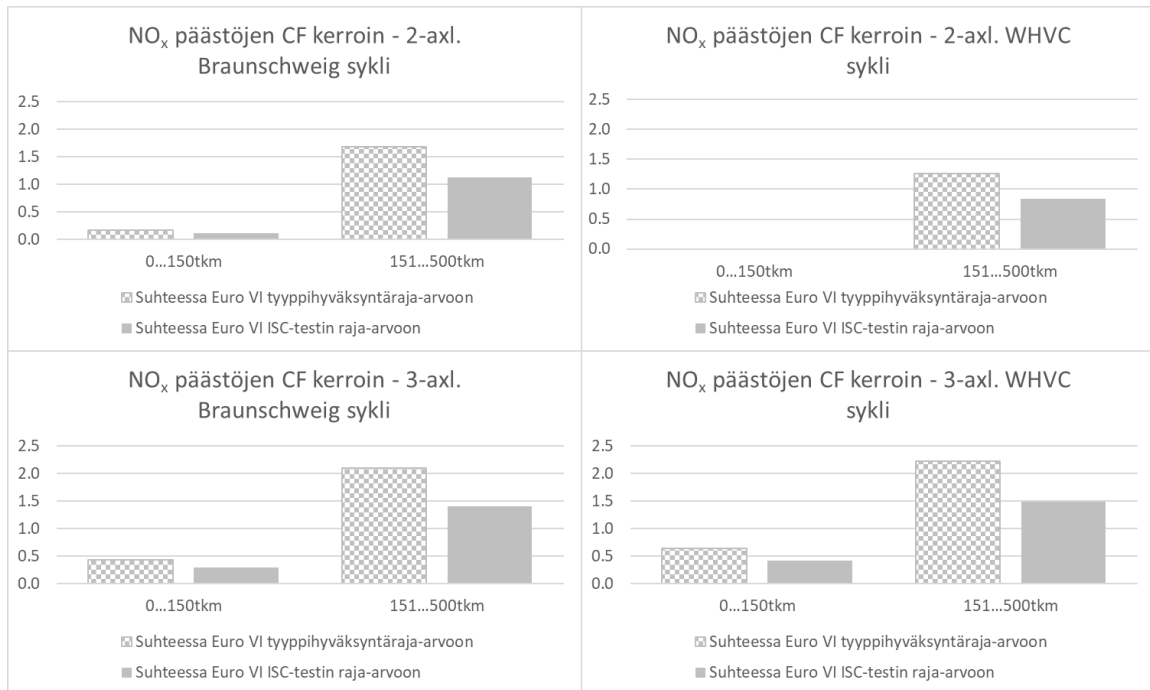
Taulukko 5:ssä on esitetty Braunschweig ja WHVC sykleillä mitattujen keskimääräisten NO_x päästöjen suhde, ns. CF-kerroin⁸, raskaan kaluston Euro VI moottorien lainsäädännön raja-arvoihin tyyppihyväksyntäsyklillä WHTC sekä käytönaikaisten päästöjen seurantamittauksella ISC⁹. Esitetyssä vertailussa on syytä kuitenkin huomata, että WHTC sykli poikkeaa kuormitusprofiililtaan Braunschweig syklistä ja WHVC syklistä, vaikka WHTC on johdettu nimenomaan WHVC syklin nopeusprofiilista. Käytönaikaisten päästöjen mittaussykli ISC suoritetaan normaalin liikenteen joukossa. Kaupunkibussien osalta syklin tulee sisältää n. 70 %:a kaupunkiajoa ja n. 30 %:a maantieajoa. ISC syklillä sallitaan 1,5 kertaiset päästöt suhteessa WHTC sykliin. Taulukko 5:n vertailu antaa kuitenkin hyvän arvion päästöjen kehityksestä ajokilometrien kasvaessa suhteessa lainsäädännön raja-arvoihin.

⁷ Luku 75 % on saatu jakamalla vetävien renkaiden tuottama teho alustadynamometrin rullille moottorin teholla. Luku pitää siten sisällään myös apulaitteiden kuluttaman tehon.

⁸ CF = Conformity factor, vaatimuksen mukaisuus kerroin

⁹ ISC = In-service Conformity, Euro VI kuorma-autojen käytönaikaisten päästöjen vaatimusten mukaisuus testi

Taulukko 5: NO_x päästöt suhteessa lainsäädännön raja-arvoihin.



WHVC sykliillä on mitattu vain yksi alle 150 tkm ajettu 2-akselinen bussi. Tämän takia Taulukko 5:ssä ei ole merkitty CF-kerrointa 0... 150 tkm ajetuille 2-akselisille busseille WHVC sykliillä.

Taulukosta nähdään hyvin edellä kuvattu keskimääräisen NO_x-päästöjen kohoaminen ajokilometrien myötä suhte tyypihyväksyntä raja-arvoihin. Alle 150 tkm ajetuilla busseilla NO_x-päästöt ovat reilusti alle raja-arvojen (CF-kerroin 0,6 tai alle) kun taas yli 150 tkm ajetuilla busseilla NO_x-päästöt ovat reilusti yli tyypihyväksyntä raja-arvon ja parhaimmillaankin aivan ISC syklin raja-arvolla (2-akseliset bussit).

6. Yhteenveto

Vuoden 2018 Rakebus -projektin myötä VTT:n ylläpitämä kaupunkibussien päästötietokanta kattaa tällä hetkellä yhteensä 178 kaupunkibussia (dieselbusseja Euro I - VI -luokissa, kaasubusseja Euro II - VI luokissa sekä EEV luokan etanolibusseja) Braunschweig-syklillä mitattuna (täysin lämmenteillä moottoreilla). Lisäystä vuoteen 2017 nähden on tullut 14:sta auton mittaustulokset. Tulokset ovat toisiinsa nähden täysin vertailukelpoiset samana pysyneen Braunschweig-mittaussyklin ja -menetelmän ansiosta.

Vuoden 2017 aikana otettiin mittauksissa käyttöön myös WHVC-sykli ja yhdistelmä kylmä- ja kuumakäynnisteisestä testauksesta. Näin tuotetaan mittaustuloksia tavalla joka vastaa Euro VI-moottorien sertifiointisykliä WHTC, ja mahdollistetaan suntaa antavavertailu moottorivalmistajan ilmoittamiin sertifiointituloksiin tai varsinaisiin raja-arvoihin.

Edelleen pääosa tuloksista ilmoitetaan ajoneuvolle muodossa g/km. WHVC-syklillä tulokset on ilmoitettu ns. yhdistelmätuloksena, joka on painotettu keskiarvo kylmän ja kuumen syklin tuloksista. Painokerroimet ovat samat kuin tyyppihyväksymisessä käytetyt (kylmäsyklin painokerroin on siis 14 %: kkoa ja kuumasyklin 86 %: kkoa). Vuonna 2018 arvoitiin myös ns. CF-kerrointa, eli tuloksia suhteessa varsinaisiin raja-arvoihin. Tällöin alustadynamometritulokset muutetaan sertifiointimittauksiin verrannollisiksi moottoriarvoiksi otamalla huomioon voimasiirron ja apulaitteiden häviöt.

Vuonna 2017 päästötietokannan raportoinnissa otettiin käyttöön myös kunkin päästöloukan mittaustulosten jaottelu kolmeen ryhmään ajokilometrien perusteella. Jaottelun johdosta nyt on nähtävissä NO_x-päästöjen kehitys ajokilometrien kasvaessa. Mittausten perusteella näyttäisivät Euro VI autojen NO_x-päästöt olevan alle 150 tkm ajettuina todella matalla tasolla, mutta nousevan melko voimakkaasti ajokilometrien kasvaessa. Muiden päästökomponenttien osalta ei vastaavanlaista kehitystä ole havaittu. CF kertoimet ovat alle 150 tkm ajetuille autoille enimmillään 0,6. 150 - 500 tkm autoilla kerroin on selvästi korkeampi, pahimmillaan 2,5-kertainen varsinaiseen raja-arvoon ja 1,6-kertainen ns. ISC-arvoon verrattuna.

Päästötietokannassa ei ole vielä mittaustulosta yli 500 tkm ajetuista Euro VI busseista. Myös Euro VI autojen mittaustulokset ovat kohtuullisen vähäiset, jolloin yksittäisten autoyksilöiden vaikutus on vielä kohtuullisen merkittävä. Näiden asioiden johdosta sekä huomioiden havaittu NO_x-päästöjen kasvu ajokilometrien kasvaessa on hyvin perustelua jatkaa Rakebus-projektin puitteissa suoritettavaa mittaustoimintaa Euro VI bussien todellisten päästöjen todentamiseksi. Euro VI lainsäädäntö edellyttää bussien pakokaasujen hallintajärjestelmiltä vähintään 300.000 km:n ja 6 vuoden tai 700.000 km:n ja 7 vuoden keskoikää riippuen ajoneuvokategorian (M3) luokasta.