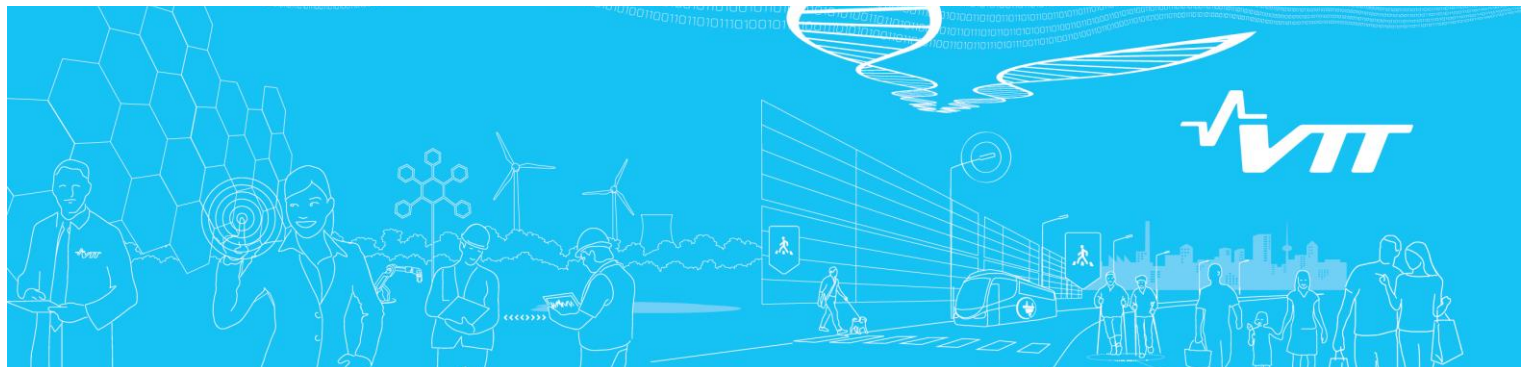




Rakebus 2016 - Projektin loppuraportti

Kirjoittaja: Petri Söderena

Luottamuksellisuus: Julkinen

Raportin nimi Rakebus 2016 - Projektin loppuraportti	
Asiakkaan nimi, yhteyshenkilö ja yhteystiedot HSL, Reijo Mäkinen	Asiakkaan viite VTT-V-109152-15 17.12.2015
Projektin nimi Rakebus 2016 - Kaupunkibussien päästömittaukset	Projektin numero/lyhytnimi Rakebus 2016
Tiivistelmä Rakebus 2016 -projektin loppuraportissa on esitetty vuoden 2016 aikana toteutettu kaupunkibussien päästämittausprojekti. Raportissa on kuvattu tausta kaupunkibussien päästötietokannan synnylle, katsaus Euro VI moottoritekniikkaan ja päästölainsäädäntöön, VTT:n raskaankaluston mittausympäristö ja -menetelmät sekä esitetty viimeisin version VTT:n kaupunkibussien päästötietokannasta. Vuoden 2016 aikana kaupunkibussien päästötietokantaan on tullut lisäyksenä yhteensä viisi dieselbussia ja kaksi CNG bussia. Tulosten perusteella voidaan todeta Euro VI luokan bussien, niin diesel kuin CNG, päästöjen olevan huomattavasti matalammalla tasolla kuin kaupunkibusseissa koskaan aikaisemmin. Euro VI autojen osalta on otettu käyttöön uusi mittauskäytäntö. Tulokset ilmoitetaan nyt täysin lämmenneelle moottorille ja lisäksi Euro VI mittausnormia mukailleen myös kylmän (14 %) ja kuumen (86 %) yhdistelmälle.	
Espoo 13.3.2017 Laatija  Petri Söderena, Senior Scientist Tarkastaja  Niils-Olof Nylund Research Professor Hyväksyjä  Jukka Lehtomäki Research Team Leader	
VTT:n yhteystiedot VTT PL 1000, 02044 VTT Puh. 020 722 111 (vaihe, klo 8.00 - 16.30) Sähköpostiosoitteet: etunimi.sukunimi@vtt.fi	
Jakelu HSL, VTT, Transsmart ohjelman internetsivut	
VTT:n nimen käyttäminen mainonnassa tai tämän raportin osittainen julkaiseminen on sallittu vain Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy:ltä saadun kirjallisen luvan perusteella.	

Luettelo käytetyistä lyhenteistä

CNG	Compressed natural gas	Paineistettumaakaasu
CO	Carbon oxide	Hiilimonoksidi
CO ₂	Carbon dioxide	Hiilidioksidi
DOC	Diesel oxidate catalyst	Diesel hapetuskatalysaattori
DPF	Diesel particulate filter	Dieselhiukkassuodatin
HC	Hydrocarbon	Hiilivety
HD	Heavy duty	Raskasajoneuvo
EAT	Exhaust aftertreatment	Pakokaasujenjälkikäsittely
EGR	Exhaust gas recirculation	Pakokaasujen takaisinkierätyk
cEGR	cooled exhaust gas recirculation	jäähdytetty pakokaasujen takaisinkierätyk
ELR	European load response	
ESC	European steady cycle	
ETC	European transient cycle	
NO _x	Nitrogen oxides	Typpioksidit
SCR	Selective catalyst reduction	Selektiivinen katalyyttinen pelkistäminen
SI	Spark ignition	Kipinäsytytteinen
PEMS	Portable emission measurement system	Kannettava päästöjen mittausjärjestelmä
PM	Particulate mass	Partikkelimassa
PN	Particulate number	Partikkelilukumäärä
VVA	Variable valve actuation	Muuttuva venttiilintoiminta
WHSC	World harmonized steady cycle	
WHTC	World harmonized transient cycle	
WHVC	World harmonized vehicle cycle	

Sisällysluettelo

Luettelo käytetyistä lyhenteistä.....	2
Sisällysluettelo	3
1. Toimeksiannon tausta.....	4
2. Johdanto.....	4
3. Katsaus Euro VI ajoneuvojen moottoritekniikkaan	6
3.1 Euro VI päästölainsäädäntö.....	6
3.2 Euro VI moottoritekniikka.....	8
3.2.1 Dieselmoottorit.....	8
3.2.2 Kaasumoottorit.....	9
4. Mittausmenetelmä.....	11
4.1 Mittausjärjestelmä.....	11
4.2 Mittaussykli.....	12
4.3 Mittausjärjestelyt.....	14
5. Tulokset.....	15
6. Yhteenveto	19

1. Toimeksiannon tausta

Rakebus 2016 -projekti on HSL:n (Helsingin seudun liikenne -kuntayhtymä) VTT Oy:ltä tilaama kaupunkibussien päästömittauksia koskeva vuoden 2016 kestänyt projekti. Projektin tuloksena HSL saa käyttöönsä VTT:n kaupunkibussien päästötietokannan, jota ylläpidetään jatkuvasti ja jota on projektin tuloksena päivitetty vuonna 2016 mitattujen bussien osalta. Asiakas on päättänyt, että bussien päästötietokanta on julkinen.

2. Johdanto

VTT Oy:n ylläpitämää kaupunkibussien päästötietokantaa on ylläpidetty vuodesta 2002 lähtien ja se käsittää tällä hetkellä yhteensä 125 Euro I - VI luokan diesel ja CNG kaupunkibussin Braunschweig syklin päästötiedot. Mittaustulokset perustuvat akkreditoituun mittaumenetelmään ja ovat keskenään täysin vertailukelpoisia, mikä tekee tietokannasta laajuudeltaan poikkeuksellisen kattavan jopa maailmanlaajuisesti.

Päästötietokanta päivittyy jatkuvasti uusien ajoneuvojen sekä seurannassa olevien ajoneuvojen mittausten myötä. Tietokannan perusteella on mahdollista määrittää ajoneuvotyyppien päästösuorituskyky sekä Euro-luokan keskiarvona, että yksilöidympänä merkki- ja Euroluokakohtaisena keskiarvona. Ajoneuvojen seurannan kautta voidaan myös kilometrikertymän vaikutusta ajoneuvojen suorituskyvyn ja päästötason pysyvyyteen.

Kaupunkibussien päästö- ja energiankulutustutkimusta on VTT:llä toteutettu useassa projektikokonaisuudessa. Projektit kattavat sekä bussi- että kuorma-autokaluston tutkimuksen.

Kertyneiden mittausten myötä on muodostunut selvä kuva ajoneuvojen teknisestä kehityksestä päästöjen ja energian käytön osalta. Koska mittausten taustalla olevat hankkeet ovat olleet julkisesti rahoitettuja, tämä tieto on 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, Suunnitteluyksikkö¹
- 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. Kaupunkibussien, kuten muidenkin raskaiden autojen, moottorit hyväksytään moottorikokeen perusteella irrallisina, ottamatta huomioon ajoneuvon muita ominaisuuksia, joten tyyppihyväksymistestien tulokset eivät ole sellaisenaan sovellettavissa todellisen liikenteen päästöjen arvioimiseen. Tyyppihyväksymiskokeessa ei myöskään mitata hiilidioksidipäästöjä eikä polttoaineen (tai energian) kulutusta.

¹ Pääkaupunkiseudun Yhteistyövaltuuskunnasta YTV:stä ja ja Helsingin kaupungin liikennelaitoksen suunnitteluyksiköstä muodostettiin vuonna 2010 HSL.

Projektitkokonaisuuudet, joissa bussitutkimusta on aikaisemmin toteutettu ja internet-osoitteet lisätiedonhauille:

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>

RASTU² 2006 – 2008

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

HDENIQ³ 2009 – 2011

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

Hyötyajoneuvot 2012



² Raskas ajoneuvokalusto: Turvallisuus, ympäristöominaisuudet ja uusi tekniikka 2006-2008

³ Energiatehokas ja älykäs raskas ajoneuvo

3. Katsaus Euro VI ajoneuvojen moottoritekniikkaan

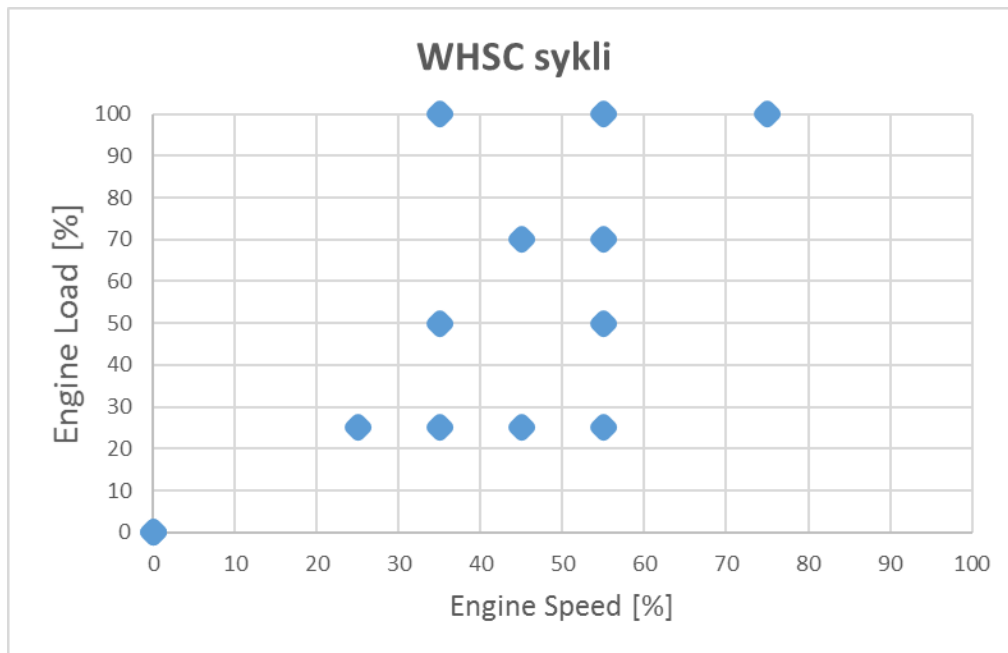
Kuorma-autojen ja bussien moottoritekniikan kehittyminen on Euroopassa seurannut hyvin tarkasti kulloinkin voimassa ollutta päästölainsäädäntöä. Suurimmat kehitysaskeleet moottoritekniikan ja -palamisen osalta ovat nimenomaan keskittyneet moottorien raakapäästöjen asettamiseen käytettävän pakokaasujen jälkikäsittelylaitteiston (EAT-laitteisto) vaatimusten mukaiselle tasolle sekä itse pakokaasujen jälkikäsittelytekniikan kehittämiseen. Ajoneuvojen polttoaineenkulutus ei ole ennen Euro VI päästölainsäädäntö-aikaa juurikaan muuttunut.

3.1 Euro VI päästölainsäädäntö

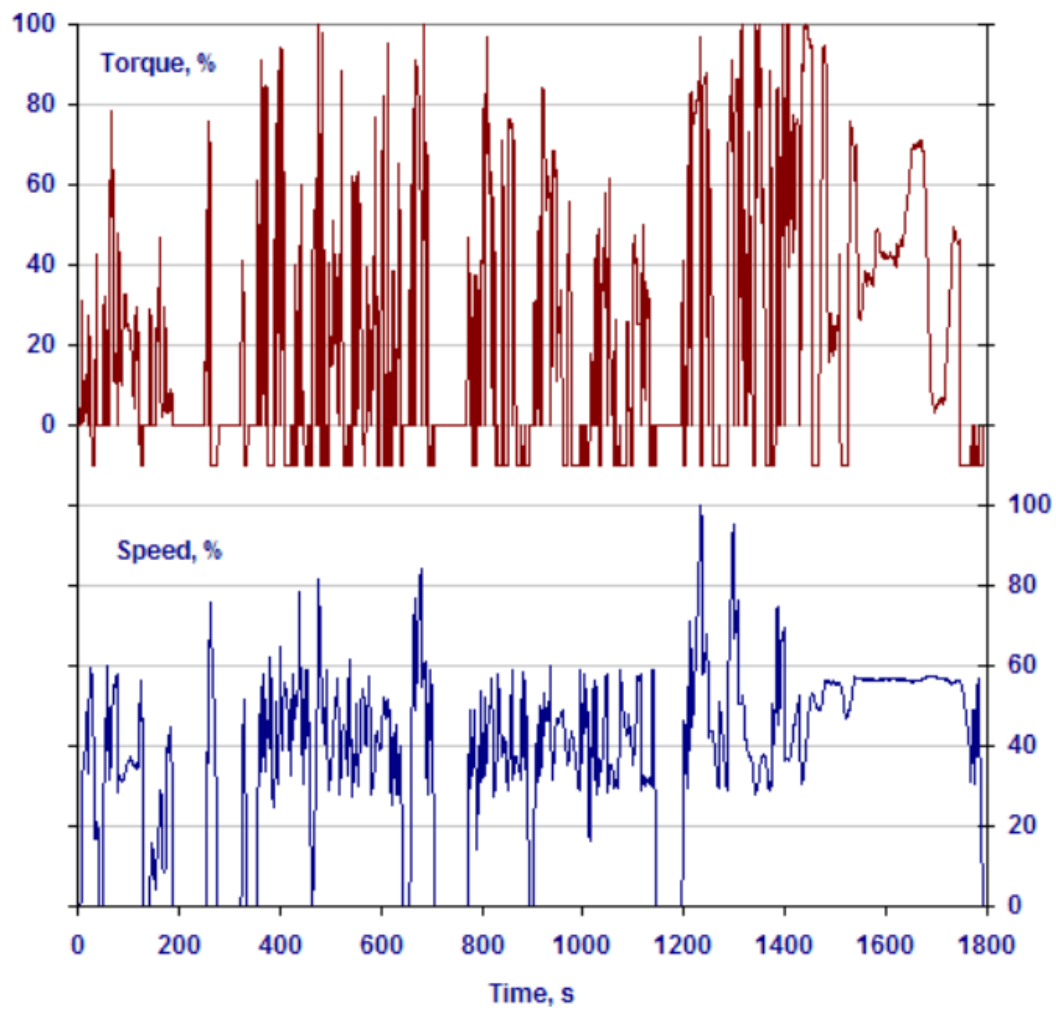
Euro VI päästölainsäädäntö kuorma- ja bussimoottoreille tuli voimaan vuonna 2013. Päästölainsäädäntö toi mukanaan uusia vaatimuksia niin päästöraja-arvoihin kuin testisykleihin sekä päästöjen jälkiseurantaan. Uusina vaatimuksina tulivat Off-Cycle, In-Service Conformity testing sekä päästötason täyttövaatimus (Emission Durability) määrätyle käyttäjälle ja ajokilometrimäärälle.

Off-Cycle testauksen tarkoitus on todentaa moottorin testisyklin ulkopuolisten toiminta-alueiden päästöjen olevan päästölainsäädännön vaatimalla tasolla. In-Service Conformity testauksessa mitataan (ei vielä valvota) ajoneuvon käytön aikaisia päästöjä siirrettävällä pakokaasujen päästömittauslaitteistoilla (PEMS) yhdistetyllä kaupunki-, maantie- ja moottoritiemittaussyklillä. Raskaalta kalustolta, yli 12 tonniset kuorma-autot sekä isot bussit, vaaditaan päästöjen täytyvän 7 vuoden tai 500 000 km ajan.

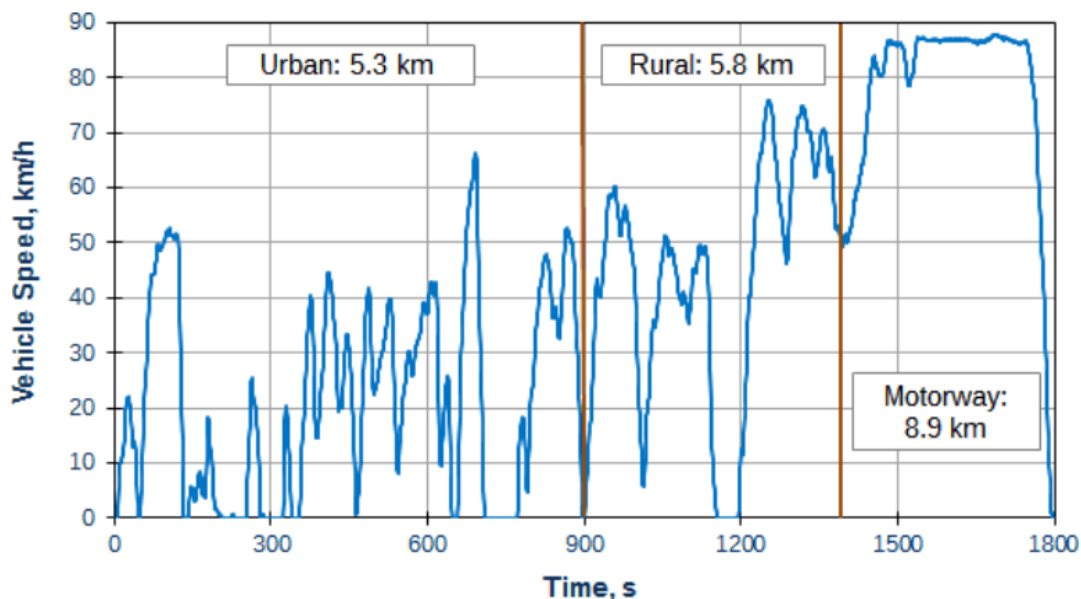
Euro VI päästölainsäädäntö toi mukanaan moottoreille myös uudet testisyklit. Vanhat ESC ja ELR testisyklit korvattiin WHSC syklillä (Kuva 1) ja ETC transienttisykli korvattiin WHTC syklillä (Kuva 2). WHSC syklin suurin ero ESC sykliin nähden on testipisteiden sijoittuminen matalammille moottorin pyörintänopeuksille. WHTC syklin on muodostettu ja johdettu tyypillisistä ajotilanteista, joita esiintyy EU:ssa, USA:ssa, Japanissa ja Australiassa. WHTC sykli ajetaan sekä kylmällä että kuumalla moottorilla. Näiden tulosten perusteella lasketaan painotettu keskiarvo koko syklille. Painotus on kylmäkäynnistys 14 % ja kuumakäynnistys 86 %. WHTC syklin muodostamiseen käytetystä datasta on johdettu alustadynamometrillä ajettava WHVC sykli. WHVC testisyklin tarkoitus on jäljitellä pelkän moottorin testisykliä ja näin toimia linkkinä ajoneuvolla ja pelkällä moottorilla mitattujen päästöjen välillä.



Kuva 1: WHSC päästötestisykli.



Kuva 2: WHTC päästötestisykli.



Kuva 3: WHVC päästötestisykli koko ajoneuvolle.

3.2 Euro VI moottoritekniikka

Euro VI vaiheen päästölainsäädännön voimaantulo vuonna 2013 tarkoitti käytännössä sitä, että kaikkien dieselmoottorivalmistajien oli pakko ottaa käyttöön SCR tekniikka NO_x päästötason saavuttamiseksi sekä panostettava EAT-laitteiston lämmönhallintaan, jotta SCR:n NO_x konversiotaso saadaan ylläpidettyä laajalla moottorin toiminta-alueella. Lisäksi myös DPF tuli käytännössä välttämättömäksi laskeneen hiukkasmassarajan takia, mutta ennen kaikkea uuden hiukkaslukumäärärajoituksen takia.

Euro VI dieselmoottoareiden päästöjenhallintamenetelmät koostuvat pääosin seuraavista yhdistelmistä:

1. DOC+DPF+SCR
2. DOC+SCRF
3. DPF+SCR
4. cEGR+DOC+DPF+SCR

3.2.1 Dieselmoottorit

Euro VI moottoreissa on keskitytty kolmeen pääasiaan Euro V moottoreihin verrattuna:

1. EAT-laitteiston lämmönhallintaan ja ajonaikaisten päästöjen hillintään
2. polttoaineenkulutuksen laskemiseen sekä
3. perusmoottorin kustannusten alentamiseen.

EAT-laitteiston lämmönhallinta on Euro VI moottoreissa äärimmäisen tärkeässä osassa, jotta päästölainsäädännön vaatimat päästötasot erityisesti NO_x osalta voidaan täyttää samalla kun ylläpidetään DPF:n toiminta siten, että sen regeneroimisesta ei aiheudu ajoneuvon normaalille käytölle haittaa. Käytännössä tämä on toteutettu EAT-laitteiston lämpötilan closed-loop ohjauksella, joko kaasuläpällä imupuolella ja/tai pakoläpällä pakoputkistossa ennen EAT-laitteistoa sekä mahdollisesti EAT-laitteistoa ennen sijoitetulla lisäpolttoaineen syötöllä.

Aktiivinen EAT-laitteiston lämmönhallinta yo. menetelmillä aiheuttaa kohtuullisen suurta lisäystä polttoaineenkulutukseen.

Uusia menetelmiä, jotka hillitsevät polttoaineenkulutuksen kasvua lämmönhallinnan aikana on tosin tuotu markkinoille, kuten MB OM471 moottorissa esitetty polttoaineenruiskutuksen erisuuri annostelu 1-3 sekä 4-6 sylinterien välillä lämmönhallinnan aikana. Myös osittaisia VVA ratkaisuja yhdistettynä pakokaasujarruun on käytössä.

Polttoaineenkulutuksen madaltamiseksi moottoreiden palamisprosessia on kehitetty Euro V moottoreista mm. maksimisylinteripainetta nostamalla, uusilla palotilaratkaisuilla ja sylinterinvirtauskentän kehittämällä sekä uusilla polttoaineenruiskutusjärjestelmillä. Kaasunvaihtoon on kiinnitetty huomiota parantamalla ahtamisen hyötysuhdetta uusilla turboahdintekniikoilla. Lisäksi moottorin kitkahäviöitä on pienennetty uusilla materiaaleilla (kuten teräsmännillä) ja pinnoitteilla. Varsinkin SCR-only ratkaisuissa tehokkaat SCR katalysaattorit mahdollistavat pitkälle moottorin säätämisen mahdollisimman alhaista polttoaineen kulutusta ajatellen, kun moottorissa ulos tulevassa pakokaasussa voidaan sallia varsin korkeita NO_x pitoisuuksia.

Alla on listattuna tulevaisuuden merkittävimmät trendit polttoaineenkulutuksen vähentämiseksi:

- Moottoreiden pyörimisnopeuksien laskeminen ajoneuvojen uusien vaihteistoratkaisujen myötä
- Start & stop -ratkaisut
- Pakokaasujen hukkalämmöntalteenotto erityisesti pitkän matkan rekka-autoissa esim. Rankine -sykliin perustuvat tekniikat ja turbocoumpound
- Ahtamisen hyötysuhteen parantaminen
- Palamisen kehittäminen mm. erilaisilla polttoaineenruiskutusstrategioilla
- Moottorikitkan ja apulaitehäviöiden pienentäminen edelleen mm. matala viskositeettiset voiteluöljyt
- Erilaiset sähköiset apulaitteet kuten vesipumppu

3.2.2 Kaasumoottorit

Euro VI kaasumoottorit ovat käytännössä kipinäsytytteisistä (SI) stokiometrisellä seossuhteella toimivista moottoreista, joissa päästöjen hallintaan käytetään kolmitiekatalysaattoria. Kolmitiekatalysaattorilla metaania käyttävät SI-moottorit täyttävät Euro VI päästöarvot sellaisenaan. Tosin huomion arvoista on se, että kaasumoottoreille ei ole Euro VI päästölainsäädännössä vaatimusta hiukkaslukumäärälle.

Euro VI vaiheen myötä kaasumoottoreita on kehitetty pidemmälle perusmoottorina toimivista dieselmoottoreista. Tämä on edistänyt polttoaineenkulutuksen laskua. Kehitys jatkuu varmasti edelleen saman suuntaisena sitä myötä, jos ja kun kaasukäyttöisien raskaiden ajoneuvojen kysyntä lisääntyy. Jo nyt osassa kaasumoottoreista käytetään täysin omaa kaasumoottoria varten suunniteltua sylinterikantta, esim. FPT:n Cursor 9 CNG.

Kaasumoottoreiden ongelmana on kuitenkin edelleen dieselmoottoriin verrattuna selkeästi matalampi hyötysuhde. Tämän hetken parhaat Euro VI HD-kaasumoottorit saavuttavat parhaimman hyötysuhteen alueella noin 40 % hyötysuhteen kun parhaat HD-dieselmoottorit liikkuvat välillä 45 - 46 %. Ero vielä korostuu osakuormille mentäessä. Esim. Braunschweig bussisyklissä (kts. kohta 4.2) kaasubussin energiankulutus on vieläkin n. 25 % korkeampi

dieselbussiin verrattuna. Näin ollen metaania polttoaineena käytettäessä CO₂ ekvivalenttipäästöt ovat kaasumootorilla vain muutaman prosenttiyksikön matalammat kuin dieselmootorilla, vaikka metaani tuottaa CO₂:a poltettua energiamäärää kohden noin 25 % vähemmän kuin diesel.

4. Mittausmenetelmä

4.1 Mittausjärjestelmä

VTT:n raskaiden ajoneuvojen tutkimuslaboratoriossa (Kuva 4) 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).

Froude Consinen 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 (transienttitestauksen). 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 (Pierburg CVS-120-WT) ja analysaattorijärjestelmän (Pierburg AMA 4000) avulla. Koska mittaukset tehdään dynaamisia ajosyklejä käyttäen, pakokaasumittaus tapahtuu periaatteessa samalla tavalla kuin transienttityyppisissä WHTC-moottorimittauksissa, eli pakokaasuista määritetään hetkelliset pitoisuudet ja yhdistämällä ne hetkelliseen pakokaasuvirtaamaan, saadaan laskettua massaemissio kunakin ajanhetkenä. Lisäksi kerätään osavirtanäyte koko kokeen (tai osasyklin) ajalta näytepussiin henkilöautojen testin tapaan. Siitä saatavaa keskiarvotulosta voidaan verrata hetkellisten emissiotasojen kautta laskettuun kokonaistulokseen.



Kuva 4. Laboratoriossa vallitsee vakiolämpötila mahdollisimman tarkan toistettavuuden saavuttamiseksi.

4.2 Mittaus sykli

Päästötietokanta koostuu alustadynamometrilla akkreditoidun mittausmenetelmän mukaan ajettujen testien tuloksista⁴. Tutkimusmenetelmän mukaisesti alustadynamometrilla suoritetaan Braunschweig -kaupunkibussisykli käyttäen inertia-asetuksena ajoneuvon (punnittua) omamassa lisättynä hyötykuormalla, joka on puolet enimmäiskuormasta. Testisyklin aikana kertyneet ympäristöpäästöt ja polttoaineen kulutus ilmoitetaan massoina ajomatkaan suhteutettuna [g/km].

Ajo-ohjelmana 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 5), ja se kuvaa vertailumittausten mukaan hyvin myös Helsingin keskustan tyypeistä ajoa. Todellisesta ajosuoritteesta tallennettu nopeus/aika-profiili toistetaan kaikilla tutkimuksen ajoneuvoilla. Toisin sanoen kaikilla ajoneuvoilla toteutetaan samanlainen ajosuorite. Tämä on keskeisen tärkeää ajoneuvojen vertailukelpoisuuden saavuttamiseksi. Erityyppisillä ajosuoritteilla ajoneuvojen suorituskyyky ei ole vertailukelpoinen.

VTT:n menetelmässä ajoneuvo 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.

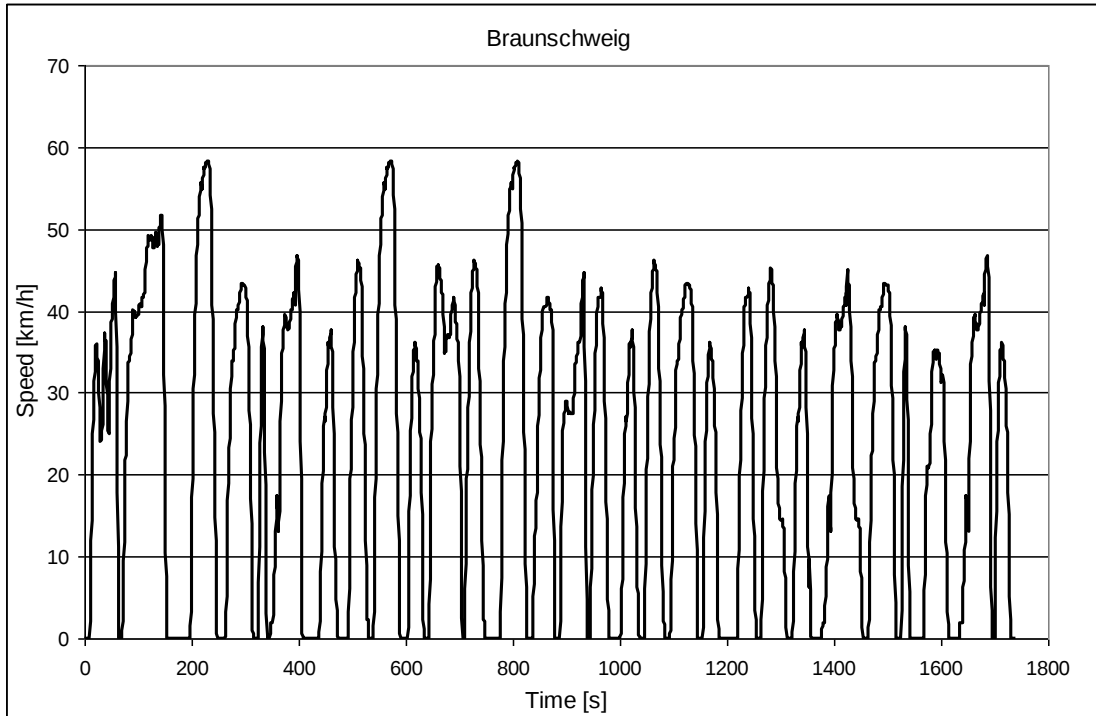
Euro VI päästöluokan myötä tyyppihyväksynnässä on siirrytty käytäntöön, jossa moottorin päästöt mitataan WHTC syklissä sekä kylmänä että lämpimänä. Kylmäkokeen jälkeen pidetään kymmenen minuutin tauko, jonka jälkeen aloitetaan lämmin koe. Moottorin päästöarvot lasketaan näiden kahden tuloksen perusteella, kylmäkokeen painoarvon ollessa 14 % ja lämpimän 86 %. Kaupunkibussien päästömittauksissa on otettu käyttöön soveltuvilta osin tyyppihyväksyntämittausta seuraava menetelmä, jossa aiemman mittausmenetelmän sijasta ensimmäinen testi aloitetaan kylmällä moottorilla, pidetään 10 minuutin tauko, jonka jälkeen testi ajetaan uudelleen lämpimällä moottorilla. Euro VI autojen osalta tulostaulukossa ilmoitetaan nyttemmin sekä yhdistelmätulos (jota periaatteessa voidaan verrata raja-arvoihin g/km -> g/kWh muunnoskertoimen avulla) sekä lämmin tulos (jota voidaan verrata edellisten Euro-luokkien tuloksiin).

Jatkossa bussit on tarkoitus testata Braunschweig syklin lisäksi WHVC syklillä, jolloin saadaan parempi vertailtavuus Euro VI raja-arvoihin (WHVC ajoneuvosykli sykli on siis WHTC sertifiointisyklin vastine).

Vuosina 2015 - 2016 toteutettiin erillinen Euro VI bussien kenttäkoe todellisten NO_x päästötasojen määrittämiseksi. Kenttäkokeen raportissa⁵ esitetään arvio siitä, että lämpötila-alueelle 0...+10 °C (Helsingissä vuoden keskilämpötila on n. +5 °C) saadaan muodostettua edustava NO_x päästöarvo kertomalla Braunschweig testin yhdistelmätulos luvulla kolme (suuruusluokkaisesti 0,5 x 3= 1,5 g/km). Jos päästöinventariolaskelmissa käytettäisiin Euro VI autoille lämpimän Braunschweig testin tuloksia, tämä johtaisi NO_x päästömäärien aliarviointiin.

⁴ FINAS:n VTT:lle myöntämän Tutkimus ja kehitys –toiminnon nykyinen akkreditointitunnus on FINAS T259.

⁵ http://www.transsmart.fi/files/390/Euro_VI_-_paastotason_kaupunkibussien_kaytonaikaiset_paastot.pdf



Kuva 5. Braunschweig kaupunkibussisyklin nopeus – aika profiili.

4.3 Mittausjärjestelyt

VTT käyttää kaupunkibussien seurantamittauksissa tavallista jakeluasemilta saatavaa kauppalaatuista, kevät-, kesä- ja syyskäyttöön tarkoitettua (-5/-15) dieselpolttoainetta (Neste). Polttoaine-erät hankitaan VTT:lle n. 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 polttoaineenkulutukseen perustuvaa laskentaa polttoaineenkulutuksen paremman mittatarkkuuden vuoksi. Polttoainetiedot perustuvat dieselin ja maakaasun osalta Euroopan Komission yhteisen tutkimuslaitoksen raportista EUR 26028 EN – 2013 Well-to-Wheels analysis of Future Automotive Fuels and Powertrains in the European Context (https://iet.jrc.ec.europa.eu/about-jec/sites/iet.jrc.ec.europa.eu/about-jec/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 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 vetopyörälle tuodusta työstä n. 20 % kuluu vierintävastuksen voittamiseen, n. 10 % ilmanvastuksen voittamiseen ja loput n. 70 % muutetaan jarruissa lämmöksi. Massan vaikutus Braunschweig-syklissä on keskimäärin n. 2,1 l/100 km jokaista tuhatta kiloa kohden.

5. Tulokset

VTT:n kaupunkibussien päästötietokannan tiivistelmät koostuvat kahdesta taulukosta: Taulukossa 1 on esitetty kootusti kaupunkibussien keskimääräiset päästöt Braunschweig syklillä ajoneuvon rakenteen ja polttoaineen perusteella jaoteltuna. Jaottelussa ovat mukana myös hybridi- sekä keveytrakente teknologiaa käyttävät kaupunkibussit. Taulukossa 2 on esitetty kaupunkibussien päästöt merkkikohtaisesti polttoaineen ja ajoneuvon tyypin mukaan jaoteltuna.

Molempien taulukoiden tulokset ovat keskimääräisiä koostuen useamman eri ajoneuvon päästötuloksien keskiarvosta. Mikäli ajoneuvon päästöt ovat mitattu useamman kuin kaksi kertaa, ajoneuvoyksilön tuloksista keskiarvoon lasketaan mukaan vain ensimmäinen ja viimeinen tulos.

Vuoden 2016 kaupunkibussien päästötietokantaan on saatu mukaan myös Euro VI luokan kaasukäyttöisiä busseja sekä lisää dieselkäyttöisiä busseja. Yhteensä Euro VI luokan eri bussityyppejä on nyt mitattuna 26. Uusia Euro VI bussimittauksia edelliseen päivitykseen nähden on tullut lisää nyt kolme diesel ja kaksi CNG 2-akselista bussia sekä kaksi 3-akselista dieselbussia. CNG Euro VI bussit ovat merkitty taulukossa 2 bussi A ja bussi B. Syynä on se, että toinen bussi oli täysin uusi ja toinen Keski-Euroopan markkinoille tarkoitettu bussi.

Tietokannan vertailtavuuden säilyttämiseksi Euro VI –päästöluokan bussien tulokset ilmoitetaan kahtena erillisenä lukuna. Ensimmäinen perustuu aikaisempaan pelkkien lämpimien mittauksien mittausmenetelmään ja toinen kylmän ja lämpimän kokeen yhdistelmään. Automerkit erittelevä taulukko 2 sisältää ainoastaan lämpimien testien tuloksia.

Braunschweig	Lukumäärä n	Ajomäärä Min	Max	CO g/km	HC g/km	CH ₄ g/km	NOx g/km	PM g/km	CO ₂ g/km	CO ₂ eqv** g/km	FC kg/100km	FC MJ/km
2 - akseliset												
Diesel Euro I	2	555025	672700	1,39	0,32		15,59	0,436	1220	1220	38,6	16,6
Diesel Euro II	13	160500	1125674	1,60	0,21		12,86	0,213	1286	1286	40,7	17,5
Diesel Euro III	14	15934	786164	0,85	0,12		8,48	0,209	1213	1213	38,4	16,6
Diesel Euro IV	8	6105	474152	2,96	0,10		8,36	0,112	1207	1207	38,2	16,5
Diesel Euro V***				2,96	0,10		7,51	0,089	1207	1207	38,2	16,5
Diesel EEV	21	1020	696931	1,08	0,03		6,49	0,068	1166	1166	36,9	15,9
Diesel Euro VI	8	15371	370017	0,14	0,01		0,15	0,014	1118	1118	35,4	15,2
Ethanol EEV	4	25249	133297	4,01	0,69		6,25	0,022	1321	1321	69,2	17,5
Diesel Hyb. EEV	5	2602	136255	0,89	0,02		5,12	0,046	848	848	26,9	11,6
Diesel Hyb. Euro VI	1	68310	68310	1,66	0,00		0,21	0,011	943	943	29,8	12,9
CNG Euro II *	2	211000	672946	4,32	7,12	6,76	16,92	0,009	1140	1295	42,1	20,7
CNG Euro III	2	37600	237189	0,05	2,64	2,38	9,44	0,019	1185	1240	43,7	21,5
CNG EEV	8	1824	640252	2,78	1,28	1,08	3,17	0,008	1276	1301	47,1	23,2
CNG Euro VI	2	347	36047	0,53	0,06	0,04	0,09	0,025	1068	1068	39,4	19,4
2 - akseliset yhdistetty kylmä ja lämmin testi *****												
Diesel Euro VI*****	3	26977	369960	0,24	0,02		0,63	0,027	1128	1128	35,7	15,4
CNG Euro VI*****	2	347	35992	0,61	0,19	0,13	0,42	0,024	1078	1081	39,8	19,6
2 - akseliset, kevyt												
Diesel****	4	993	26436	0,88	0,03		6,70	0,047	953	953	30,17	13,0
Diesel Euro VI	2	8977	21726	0,14	0,01		0,37	0,006	961	961	30,41	13,1
3 - akseliset												
Diesel Euro V	4	1400	232494	6,68	0,03		3,16	0,089	1414	1414	44,8	19,3
Diesel EEV	7	5444	94910	1,24	0,04		6,02	0,072	1462	1462	46,3	19,9
Diesel Euro VI	6	10215	198950	0,16	0,00		0,51	0,007	1383	1383	43,8	18,9
CNG EEV	5	121773	651529	10,96	1,69	1,53	6,37	0,010	1407	1442	51,9	25,5
3 - akseliset yhdistetty kylmä ja lämmin testi *****												
Diesel Euro VI*****	2	86249	198899	0,27	0,01		2,07	0,026	1439	1439	45,6	19,6
*Maakaasuautoille käytetty CH ₄ = THC * 0.95												
** CO ₂ eqv = CO ₂ + 23 * CH ₄												
*** Euro V tulokset arvioitu Euro IV tulosten perusteella												
**** sisältää tulokset päästöluokista Euro III, Euro IV ja EEV												
***** Painotettu keskiarvo kylmän (14 %) ja lämpimän (86 %) testin tuloksista												

Taulukko 1: Euro I - VI diesel ja CNG kaupunkibussien keskimääräiset päästöt rakenteen mukaan jaoteltuna Braunschweig syklillä.

Braunschweig														
Merkki	Taso	Polttoaine	Tyyppi	Exht.	CO [g/km]	HC [g/km]	CH4 [g/km]	NOx [g/km]	PM [g/km]	CO2 [g/km]	CO2 eqv. **	FC [kg/100 km]	FC [MJ/km]	UC [kg/100 km]
Volvo	Euro I	Diesel	2 - axle		0,06	0,12		19,47	0,248	1352	1352	42,8	18,4	
Scania	Euro I	Diesel	2 - axle		2,71	0,52		11,71	0,624	1087	1087	34,4	14,8	
Volvo	Euro II	Diesel	2 - axle		1,16	0,14		12,35	0,157	1343	1343	42,5	18,3	
MB	Euro II	Diesel	2 - axle		1,26	0,31		12,43	0,248	1236	1236	39,1	16,9	
Scania	Euro II	Diesel	2 - axle		0,98	0,24		8,77	0,176	1267	1267	40,1	17,3	
Kabus	Euro II	Diesel	2 - axle		4,31	0,15		16,54	0,398	1368	1368	43,3	18,7	
Renault	Euro II	Diesel	2 - axle		2,40	0,26		15,22	0,257	1155	1155	36,5	15,7	
Volvo *	Euro II	CNG	2 - axle		2,87	8,96	8,51	17,58	0,007	1171	1367	43,2	21,3	
Volvo	Euro II	Diesel	2 - axle	PDPF	0,07	0,03		12,34	0,075	1267	1267	40,1	17,3	
Volvo	Euro II	Diesel	2 - axle	CRT	0,04	0,10		11,75	0,407	1589	1589	50,3	21,7	
Volvo	Euro II	Diesel	2 - axle	SCRT	0,12	0,01		1,54	0,010	1314	1314	41,6	17,9	
Volvo	Euro III	Diesel	2 - axle		1,31	0,02		8,81	0,308	1244	1244	39,4	17,0	
Scania	Euro III	Diesel	2 - axle		0,60	0,17		8,30	0,154	1195	1195	37,8	16,3	
Volvo	Euro III	CNG	2 - axle		0,05	2,64	2,38	9,44	0,019	1185	1240	43,7	21,5	
Scania	Euro III	Diesel	2 - axle	PDPF	0,13	0,03		7,37	0,093	1141	1141	36,1	15,6	
Scania	Euro III	Diesel	2 - axle	SCR + DPF	0,06	0,00		2,51	0,007	1194	1194	37,8	16,3	1,40
Volvo	Euro III	Diesel	2 - axle	CRT	1,17	0,10		9,70	0,042	1103	1103	34,9	15,0	
Volvo	Euro IV	Diesel	2 - axle	SCR	6,71	0,02		11,44	0,083	1119	1119	35,4	15,3	0,55
MB	Euro IV	Diesel	2 - axle	SCR	1,41	0,04		2,57	0,058	1130	1130	35,8	15,4	
Scania	Euro IV	Diesel	2 - axle	EGR	1,78	0,14		8,29	0,134	1258	1258	39,8	17,2	
Iveco	EEV	Diesel	2 - axle	SCRT	0,17	0,00		6,87	0,013	1107		35,0	15,1	2,35
Iveco	EEV	Diesel	2 - axle	SCR	5,03	0,04		6,56	0,154	1208	1208	38,2	16,5	
Volvo	EEV	Diesel	2 - axle	SCR	3,18	0,04		6,09	0,072	1120	1120	35,5	15,3	2,20
Scania	EEV	Diesel	2 - axle	EGR	0,41	0,06		6,43	0,107	1228	1228	38,9	16,7	
VDL	EEV	Diesel	2 - axle	SCRT	0,58	0,01		5,66	0,011	1217	1217	38,5	16,6	
Volvo	EEV	Diesel	2 - axle	SCRT	0,04	0,01		6,96	0,031	1107	1107	35,0	15,1	1,75
VDL	EEV	Diesel	lt. 2 - axle	SCR	0,55	0,01		5,47	0,036	919	919	29,1	12,5	
Scania	EEV	Ethanol	2 - axle		4,01	0,69		6,25	0,022	1321	1321	69,2	17,5	
Iveco	EEV	CNG	2 - axle		2,62	1,17	1,11	2,16	0,008	1038	1063	38,3	18,8	
MAN	EEV	CNG	2 - axle		3,86	0,80	0,76	2,69	0,004	1201	1218	44,3	21,8	
MB	EEV	CNG	2 - axle		0,14	2,53	2,40	4,89	0,016	1583	1639	58,4	28,7	
Iveco	Euro VI	Diesel	2 - axle		0,08	0,00		0,02	0,00	1119	1119	35,42	15,3	
Mercedes-Benz	Euro VI	Diesel	2 - axle		0,20	0,00		0,32	0,05	1045	1045	33,08	14,3	
Scania	Euro VI	Diesel	2 - axle		0,09	0,01		0,03	0,01	1186	1186	37,54	16,2	
Volvo	Euro VI	Diesel	2 - axle		0,18	0,01		0,16	0,01	1108	1108	35,07	15,1	2,04
MB	Euro VI*****	Diesel	2 - axle		0,21	0,02		0,50	0,04	1072	1072	33,91	14,6	
Scania	Euro VI*****	Diesel	2 - axle		0,12	0,03		0,20	0,04	1211	1211	38,32	16,5	
Volvo	Euro VI*****	Diesel	2 - axle		0,37	0,01		1,20	0,01	1101	1101	34,84	15,0	2,00
Bussi A	Euro VI	CNG	2 - axle	KAT	0,65	0,10	0,07	0,11	0,029	1025	1027	37,8	18,6	
Bussi B	Euro VI	CNG	2 - axle	KAT	0,40	0,03	0,00	0,07	0,022	1110	1110	41,0	20,2	
Scania	Euro III	Diesel	3 - axle	SCR + DPF	0,08	0,01		0,47	0,016	1443	1443	45,6	19,7	
Scania	Euro IV	Diesel	3 - axle	EGR	0,98	0,05		9,75	0,162	1501	1501	47,5	20,5	
Volvo	Euro V	Diesel	3 - axle	SCR	6,68	0,03		3,16	0,089	1414	1414	44,8	19,3	2,94
Volvo	EEV	Diesel	3 - axle	SCR	1,33	0,07		4,76	0,082	1483	1483	46,9	20,2	2,70
Scania	EEV	Diesel	3 - axle	EGR	0,13	0,01		9,53	0,082	1395	1395	44,2	19,0	
Golden Dragon	EEV	Diesel	3 - axle	SCR	0,35	0,02		2,97	0,042	1407	1407	44,5	19,2	4,10
VDL	EEV	Diesel	3 - axle	SCRT	3,96	0,02		6,19	0,093	1518	1518	48,0	20,7	1,66
Scania	Euro VI	Diesel	3 - axle		0,09	0,00		0,74	0,007	1410	1410	44,6	19,2	
VDL	Euro VI	Diesel	3 - axle		0,43	0,00		0,77	0,009	1356	1356	42,9	18,5	4,39
Volvo	Euro VI	Diesel	3 - axle		0,14	0,01		0,03	0,005	1355	1355	42,9	18,5	3,21
Scania	Euro VI*****	Diesel	3 - axle		0,16	0,01	0,00	3,10	0,03	1489	1489	47,13	20,3	
VDL	Euro VI*****	Diesel	3 - axle		0,39	0,00	0,00	1,03	0,02	1390	1390	43,97	19,0	4,58
MAN	EEV	CNG	3 - axle	EGR	12,90	1,96	1,77	7,75	0,011	1398	1439	51,6	25,4	
Solaris	EEV	CNG	3 - axle	SEGR	3,19	0,63	0,56	0,83	0,004	1445	1458	53,3	26,2	

*Maakaasuautoille käytetty CH₄ = THC * 0.95

** CO₂ eqv = CO₂ + 23 * CH₄

*** Euro V tulokset arvioitu Euro IV tulosten perusteella

**** sisältää tulokset päästöluokista Euro III, Euro IV ja EEV

***** Painotettu keskiarvo kylmän (14 %) ja lämpimän (86 %) testin tuloksista

*Maakaasuautoille käytetty CH₄ = THC * 0.95

** CO₂ eqv = CO₂ + 23 * CH₄

*** Euro V tulokset arvioitu Euro IV tulosten perusteella

**** sisältää tulokset päästöluokista Euro III, Euro IV ja EEV

***** Painotettu keskiarvo kylmän (14 %) ja lämpimän (86 %) testin tuloksista

Taulukko 2: Euro I - VI kaupunkibussien merkkikohtainen päästötaulukko päästöluokan sekä ajoneuvon tyyppin mukaan jaoteltuna.

Taulukon 1 Euro VI päästöluokan dieselbussien tuloksista voidaan huomata, että päästötaso on laskenut selvästi Euro V luokan päästötasosta niin CO, NO_x kuin PM päästöjen osalta. Kaikissa kolmessa päästökomponeenteissa pienentymä on selkeästi suurempi kuin mitä päästövaiheen muutoksesta suoraan laskeminen antaa. Tämä selittyy kappaleessa 3.2 selostetun parantuneen EAT-laitteiston lämmönhallinnan sekä SCR+DPF yhdistelmän käyttöönotosta. On myös yleisesti ollut tiedossa, että Euro V luokan ajoneuvot eivät olleet

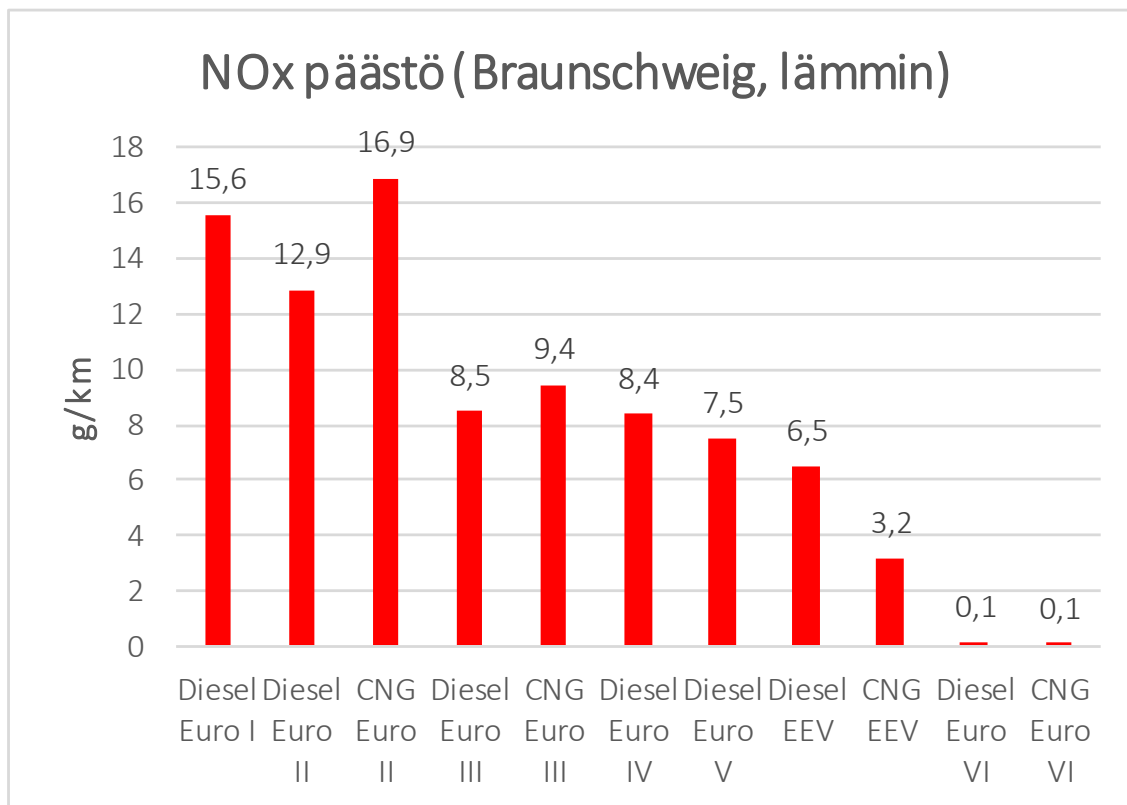
käytännönpäästötasoltaan lähelläkään sitä tasoa, johon päästölainsäädännöllä ne oli tarkoitus ohjata.

Myös Euro VI CNG bussien osalta CO, NO_x ja HC päästöt ovat laskeneet merkittävästi Euro V luokan busseihin verrattuna. CNG bussien hiukkasmassapäästöissä ei ole tapahtunut merkittävää muutosta Euro I - VI luokkien välillä. Tämä selittyy yksinkertaisesti sillä, että SI palamisen menetelmänä tuottaa maakaasua poltettaessa hyvin vähän hiukkasia.

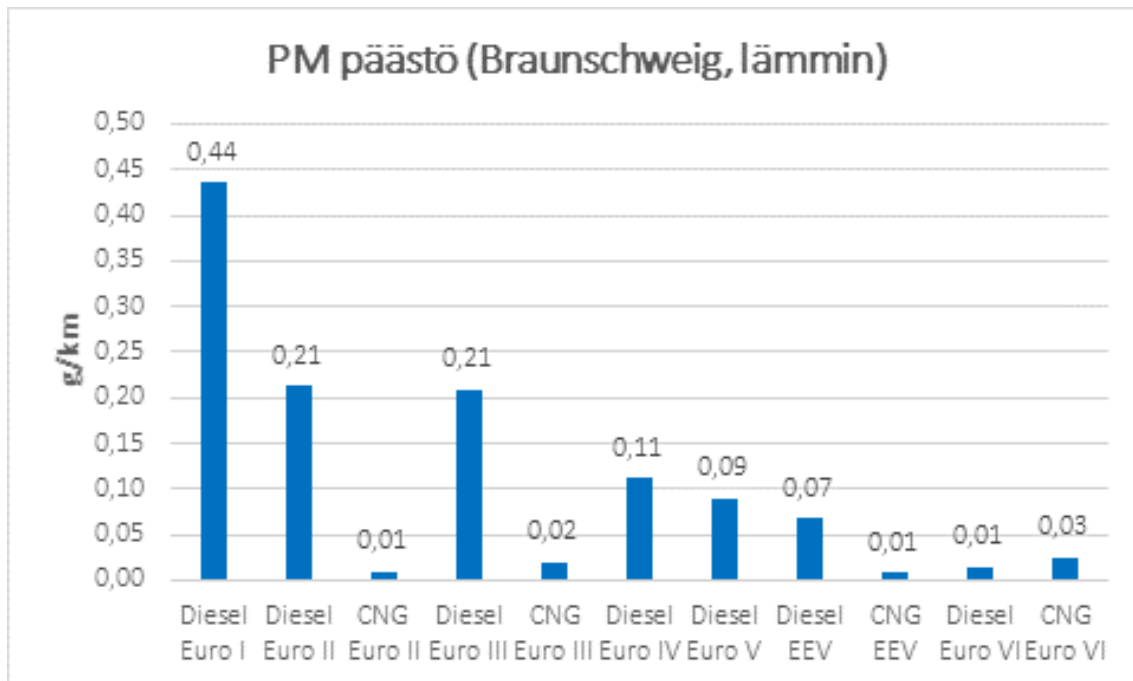
Taulukon 1 tuloksista voi myös huomata, että Euro VI luokassa bussien energiankulutus, niin diesel kuin CNG, on laskenut edeltäviin Euro luokkiin nähden. Euro luokkien I - V aikana energiankulutus on pysynyt dieselbusseilla lähes vakiona olleen kaksiakselisilla noin 16,5 MJ/km, kun Euro VI luokan keskiarvo on noin 15,2 MJ/km. Kaasubusseilla energiankulutus on noussut Euro II - V (EEV) luokkien välissä arvosta 20,7 MJ/km arvoon 23,2 MJ/km ja laskenut Euro VI luokkaan siirryttäessä arvoon 19,4 MJ/km. Nämä tulokset selittyvät osaltaan seikoilla, joita tuotiin esille kappaleessa 3.2.

Euro VI bussien kohdalla NO_x päästöt ovat selkeästi suuremmat yhdistelmäsyklin (kylmä+kuuma) tuloksia verrattaessa pelkän kuumen syklin tuloksiin, vaikka kylmäsyklin painotus on vain 14 % ja kylmäsyklin kylmäkäynnistys tapahtuu 20 - 25 °C lämpötilasta. Tämä osoittaa sen, että Euro VI luokan bussit ovat parantuneesta EAT-laitteiston lämmönhallinnasta huolimatta myös vaikeuksissa saavuttaakseen riittävän NO_x konversiotason matalalla moottorin kuormituksella ja/tai kylmällä EAT-laitteistolla. Tämän takia kenttäseuranta ja ajonaikaisten päästöjen mittaaminen ovat hyvin perusteltuja ja tärkeitä suoritettavia toimia myös Euro VI luokan busseille.

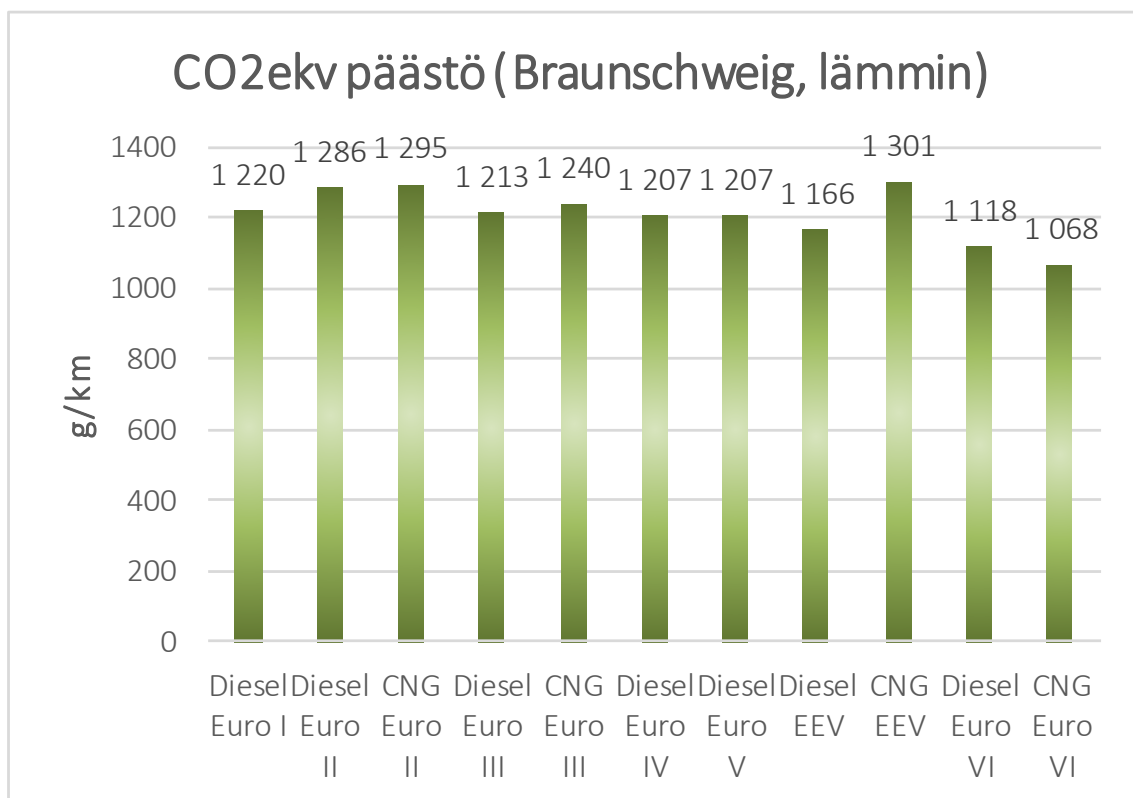
Kuvista 6 (NO_x), 7 (hiukkaset), 8 (CO_{2ekv}) ja 9 (energian kulutus) nähdään yhteenvetona vielä suoritusarvojen kehittyminen Euro I tasoista busseista Euro VI tasoihin busseihin. Kuvat osoittavat hyvin, kuinka Euro päästömääräykset ovat tähän asti keskittyneet haitallisten päästöjen (varsinkin NO_x ja PM) pienentämiseen ja CO₂ päästöjen vähenemiseen on jäänyt sivualalle.



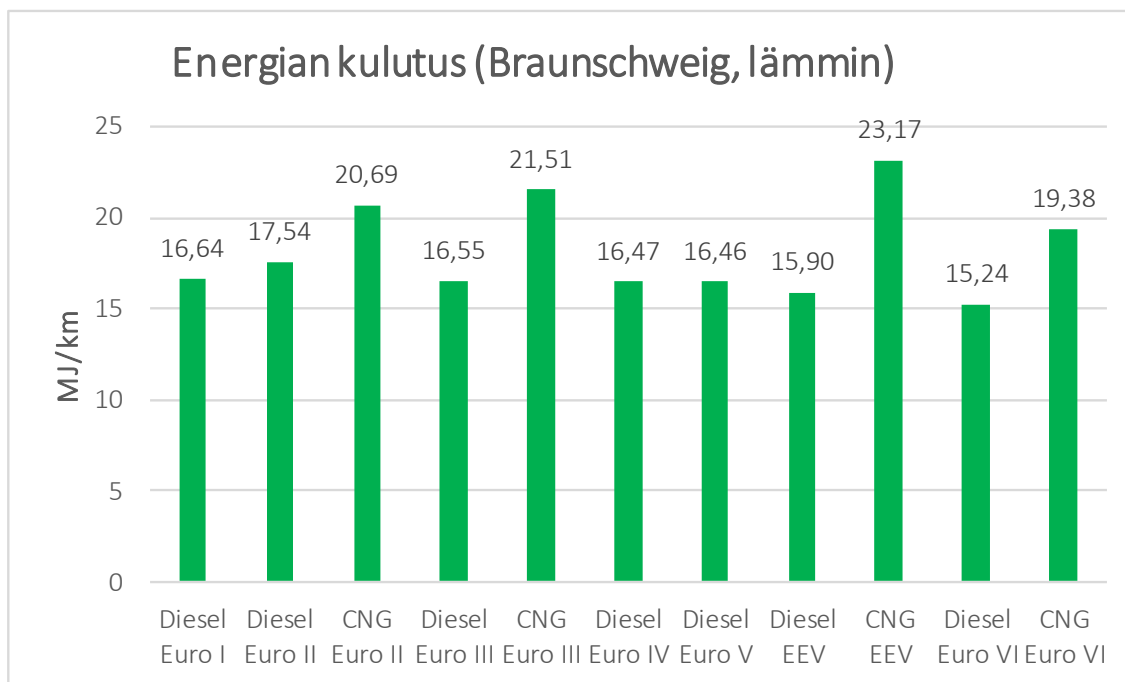
Kuva 6: NO_x päästöjen kehittyminen Euro I - VI luokkien välillä.



Kuva 7: PM Päästöjen kehittyminen.



Kuva 8: CO₂ekv päästöjen kehittyminen. CH₄ päästö huomioitu kertoimella 23.



Kuva 9: Energiankulutuksen kehittyminen

6. Yhteenveto

Vuoden 2016 Rakebus -projektin myötä VTT:n ylläpitämä kaupunkibussien päästötietokanta käsittää yhteensä 125 diesel ja CNG Euro I - VI bussin tulokset esilämmitetyltä Braunschweig -sykliltä. Tulokset ovat toisiinsa nähden täysin vertailukelpoiset samana pysyneen mittaussyklin ja -menetelmän ansiosta.

Vuoden 2016 aikana otettiin mittauksissa käyttöön myös kylmä Braunschweig -sykli, joka ajetaan ennen kuumasyklejä. Kylmän ja kuuman syklin yhdistelmätulokset ovat nyt siis ensimmäistä kertaa mukana päästötietokannassa.

Euro VI päästölainsäädännön myötä moottorivalmistajat ovat selvästi parantaneet EAT-laitteiston tehokkuutta ja sen toimintaa, mikä näkyy myös VTT:n mittaamissa tuloksissa, Kuva 6 ja Kuva 7. Päästöt ovat laskeneet, niin diesel kuin CNG busseilla, selvästi verrattuna edelliseen Euro V päästoluokkaan. Tuloksista näkyy myös se, että Euro VI luokan busseilla kylmäsyklissä NO_x päästöt ovat selkeästi korkeammat kuin kuumasyklissä. Tämä alleviivaa tarvetta jatkuvalla päästöjen seurannalla ja erityisesti kenttäkokeille, joissa ajoneuvoja päästään mittaamaan todellisessa käyttötilanteissa ja olosuhteissa.