



BUSSIKALUSTON PAKOKAASUPÄÄSTÖJEN EVALUOINTI: VUOSIRAPORTTI 2006

Kirjoittajat

Kimmo Erkkilä, Nils-Olof Nylund

Luottamuksellisuus

Julkinen

Raportin nimi Kaupunkibussien päästömittaukset 2006 (RASTU - RAKEBUS)	
Asiakkaan nimi, yhteyshenkilö ja yhteystiedot YTV, HKL, RASTU -projekti	Asiakkaan viite
Projektin nimi Raskas ajoneuvokalusto: Turvallisuus, ympäristöominaisuudet ja uusi tekniikka. (Alatehtävät: 1.1 Euro 4/5 autojen suorituskyky ja 1.9 Pakokaasupäästöt)	Projektin numero/lyhytnimi 3155-1.1
Raportin laatija(t) Kimmo Erkkilä, Nils-Olof Nylund	Sivujen/liitesivujen lukumäärä 28 s. + liit. 6 s.
Avainsanat Päästökertoimet, kaupunkibussit, pakokaasupäästöt, Braunschweig	Raportin numero VTT-R-03446-07
Tiivistelmä <p>RakeBus –hanke tuottaa päästötietoa ja päästökertoimia bussikalustosta. Toiminta on jatkunut katkeamattomana vuodesta 2002. Raskaiden ajoneuvojen päästörajat kiristyivät oleellisesti 2005-2006, ja markkinoille on tullut uutta dieseltekniikkaa.</p> <p>Vuonna 2006 aikaisemmin itsenäisenä projektina toimineen RakeBus-projektin tekemiset yhdistettiin osaksi vuosille 2006-2007 suunniteltua RASTU-hanketta. Energiankulutus ja päästöt ovat usein sidoksissa toisiinsa, joten niiden tutkimusta ei voida erottaa toisistaan. Mm. tästä syystä toimintojen yhdistäminen oli perusteltua.</p> <p>Vuosina 2002-2005 toimineen RakeBus-projektin muodostamaa kaupunkibussien päästötietokantaa päivitettiin nyt uusimmilla Euro 4 ja Euro 5 autojen tuloksilla. Uusien tiukempien päästörajoitusten myötä raskaisiin ajoneuvoihin on tullut erilaisia päästöjen vähentämisyjärjestelmiä, joiden vaikutuksesta todellisesta kaupunkibussin ajosta syntyviin päästöihin ei ole juurikaan tietoa saatavilla.</p> <p>Kaupunkibussien kuormitusyksi poikkeaa raskaiden moottorien päästöhyväksyntäsyklistä oleellisesti. Tästä syystä erinäisissä liikenteestä aiheutuvien päästöjen laskelmissa ja niiden vaikutusten arvioinneissa on syytä käyttää lähtöarvoina todellisia kaupunkibusseista mitattuja päästökertoimia. Uusimpien mittaustulosten perusteella voitiin nyt päivittää päästökertoimet kattamaan myös uusimmat tekniikat.</p>	
Luottamuksellisuus	julkinen
Espoo 11.4.2007 Allekirjoitukset	
Kimmo Erkkilä projektipäällikkö	Juhani Laurikko tiimipäällikkö
Jukka Lehtomäki teknologiapäällikkö	
VTT:n yhteystiedot	
Jakelu (asiakkaat ja VTT) YTV, HKL, RASTU-projekti	
<i>VTT:n nimen käyttäminen mainonnassa tai tämän raportin osittainen julkaiseminen on sallittu vain VTT:ltä saadun kirjallisen luvan perusteella.</i>	

Alkusanat

Tämä raportti käsittelee RASTU (*Raskas ajoneuvokalusto: Turvallisuus, ympäristö-ominaisuudet ja uusi tekniikka*) -hankkeessa vuonna 2006 tehtyjä kaupunkibussien päästömittauksia ja niihin liittyvää tutkimusta.

Vuosina 2002 - 2005 VTT:n kaupunkibussien päästötutkimus toteutettiin erillisenä projektinaan. Kyseisessä *Kaupunkibussien pakokaasupäästöjen evaluointi – RakeBus* -projektissa määriteltiin mm. kaupunkibussien päästöjä todellista ajoa vastaavissa ajotapahtumissa. Projektissa myös seurattiin valittujen autoyksilöiden vanhenemista ja vertailtiin maakaasukäyttöisten bussien päästöjä vastaaviin diesel-versioihin.

Vuodesta 2006 alkaen, päätettiin RakeBus'n aloittama kaupunkibussien päästötutkimus liittää synergiasyistä uuteen vuosina 2006 - 2008 toteutettavaan RASTU-hankkeeseen. Raskaalla alustadynamometrilla suoritettavia bussimittauksia tarvitaan sekä energiatehokkuuden että pakokaasupäästöjen määrittelyssä, joten samat mittauksen palvelevat molempia tarkoituksia.

Bussien päästötutkimus palvelee RASTU'n osallistujista eritoten pääkaupunkiseudun liikenteen tilaajatahoja, YTV:tä ja HKL:ää, mutta sen tuottaman tiedon toivotaan hyödyttävän myös muita projektiin osallistujia, kuten liikenteen harjoittajia.

Espoo 11.4.2007

Kimmo Erkkilä, Nils-Olof Nylund

Sisällysluettelo

1	Tausta	4
2	Raskaiden ajoneuvojen tutkimus VTT:llä	5
2.1	Yleistä	5
2.2	Mittalaitteet ja yleiset mittausmenetelmät	5
3	Koeohjelma ja menetelmät	7
3.1	Projektiokohtaiset mittausmenetelmät	8
4	Tulokset ja tulosten arviointi	9
4.1	Vuoden 2006 uudet tulokset	9
4.2	Seuranta-autot ja PDPF	13
4.3	Päästötietokanta	15
4.4	Päästökertoimet	18
4.4.1	Kaksiakseliset kaupunkibussit	18
4.4.2	3-akselisten autojen päästöjen arviointi	23
4.4.3	Päästöt pääväylillä ja kehäteillä	25
5	Johtopäätökset ja yhteenveto	27
	Lähdeviitteet	28

1 Tausta

1.10.2006 alkaen kaikkien uusina myytävien kuorma- ja linja-autojen on tullut täyttää vähintään Euro 4 –päästöraja-arvot. Uudet Euro 4 -määräykset ovat merkittävästi aikaisempia Euro 3 –määräyksiä tiukempia. Partikkelien osalta päästöraja laskee peräti viidennekseen (80%) ja typen oksidienkin osalta raja tiukkenee 30%.

Moottoriteknisesti uudet rajat ovat haastavia ja ne pakottavat moottorinvalmistajat turvautumaan erilaisiin päästöjä vähentäviin järjestelmiin. Riippuen valmistajasta ja automallista, nämä järjestelmät käsittävät joko pakokaasujen takaisinkierätyksen (EGR), ureakatalysaattorin (SCR), partikkelisuodattimen/-katalysaattorin (DPF/POC/PDPF) tai näiden kombinaatioita.

Kaikilla edellä mainituilla päästöjen vähentämiskeinoilla on sekä hyvät että huonot puolensa. SCR poistaa tehokkaasti typen oksideja, joten moottori voidaan säätää polttoainenkulutuksen kannalta aikaisempaa edullisemmaksi. Vastapainoksi tulee ureansyöttöjärjestelmän aiheuttamat lisäkustannukset ja ureankulutus. EGR-järjestelmää käytettäessä puolestaan ei tarvita erillistä lisäainetta, mutta toisaalta moottoria ei voida säätää kulutuksen kannalta optimaaliseksi. EGR:ää käytettäessä haasteita tulee myös lisääntyneestä karstoittumisvaarasta. Partikkelisuodattimet ja -katalysaattorit vähentävät tehokkaasti partikkelipäästöjä, eikä lisäaineita tarvita, mutta ilman mitään typen oksidien vähentämiskeinoja joudutaan moottori säätämään vähän NOx-päästöjä tuottavaksi, eli kulutuksen kannalta epäedulliseksi.

Kaupunkibussien moottorien kuormitus poikkeaa oleellisesti virallisesta moottorien päästötyypityksessä käytettävästä ETC-syklistä. Kaupunkiajossa moottoria käytetään suhteessa matalalla kuormitusasteella ja ajo koostuu jatkuvasti toistuvista kiihdytyksistä ja jarrutuksista. Tällaisesta kaupunkibussien ajotapahtumasta aiheutuville päästöille ei ole lainsäädännössä asetettu erikseen raja-arvoja, joten nähtäväksi jää, seuraavatko käytännön päästöt kiristyviä päästömääräyksiä.

Aikaisemmassa RakeBus-projektissa perustettu kaupunkibussien päästötietopankki antaa vahvan perustan uusien autojen päästötuloksia arvioitaessa.

2 Raskaiden ajoneuvojen tutkimus VTT:llä

2.1 Yleistä

Vuonna 2000 VTT käynnisti raskaisiin ajoneuvoihin liittyvän RAKE – tutkimuskokonaisuuden (RAKE= Raskaan ajoneuvokaluston kehityshanke). Kokonaisuuteen sisältyi uuden raskaan ajoneuvokaluston tutkimuslaboratorion luominen vuosina 2000 – 2001, ja ensimmäisen vaiheen busseihin ja kuorma-autoihin liittyvä tutkimustoiminta vuosina 2002 – 2004. Toinen tutkimusvaihe (2005 ->) on nyt meneillään.

Yksi uuden tutkimuslaboratorion keskeisimpiä laitteistoja on raskaan kaluston alustadynamometri pakokaasumittausmahdollisuuksineen. Vuoteen 2006 mennessä VTT on mitannut jo noin 150 raskasta ajoneuvoa, joista busseja on ollut n. 80 ja kuorma-autoja n. 70 kpl. Yksittäisiä mittauksia on kertynyt yli 2200 kpl.

Alustadynamometrimittaus tarjoaa monia etuja moottorimittauksiin verrattuna. Mitattaessa kokonaista ajoneuvoa irtomoottorin sijaan asennus- ja valmistelutyön määrä on huomattavasti pienempi. Tämän ansiosta läpimenoaika on selvästi lyhyempi, ja tutkittavien autoyksilöiden määrää voidaan nostaa. Näin myös raskaiden ajoneuvojen osalta avautuu mahdollisuuksia käytön aikaiseen pakokaasuvalvontaan ja erilaisten kenttäkokeiden helppoon seurantaan.

Alustadynamometrin ohjelmoinnissa huomioidaan koko ajoneuvon ominaisuudet, mukaan lukien auton massa ja ajovastukset. Mikä tahansa todellista ajoa kuvaava sykli voidaan melko helposti siirtää ajettavaksi alustadynamometrillä laboratorio-olosuhteissa. VTT:n alustadynamometrillä on lisäksi mahdollista sisällyttää tien gradientti (kaltevuus) ajovastusten ohjelmointiin. Näin voidaan tuottaa todenmukaisia ajomatkaan suhteutettuja g/km –muotoisia päästökertoimia sekä bussi- että kuorma-autokalustolle. Koska bussien osalta reitit ja aikataulut on kiinnitetty, on helppoa tehdä kokonaispäästölaskelmia ja reittikohtaisia laskelmia matkapohjaisten päästökertoimien perusteella.

Tien päällä tapahtuvaan mittaukseen verrattuna alustadynamometrimittaus tarjoaa paremmin kontrolloidut olosuhteet, voidaanhan alustadynamometrimittauksessa sään vaihtelun ja muun liikenteen aiheuttamat häiriöt eliminoida kokonaan. Lisäksi mittausasetelma jossa ajoneuvo on alustadynamometrillä ja jossa käytetään kiinteitä mittalaitteita, tarjoaa paremmat mahdollisuudet hyvän mittaustarkkuuden saavuttamiseen. Myös monimutkaisen instrumentoinnin vaativat erikoispakokaasumittaukset mahdollistuvat alustadynamometrissa.

2.2 Mittalaitteet ja yleiset mittausmenetelmät

Uudessa tutkimuslaboratoriossa on alustadynamometrin, moottoridynamometrin ja täyden virtaaman CVS- emissiolaitteiston lisäksi monipuolinen laitteisto erikoispakokaasumittauksiin, mukaan lukien laitteistot hiukkasten yksityiskohtaiseen analysointiin. Laitteisto on kuvattu VTT:n verkkosivuilla osoitteessa:

<http://www.vtt.fi/pro/pro3/pro31/indexe.htm>

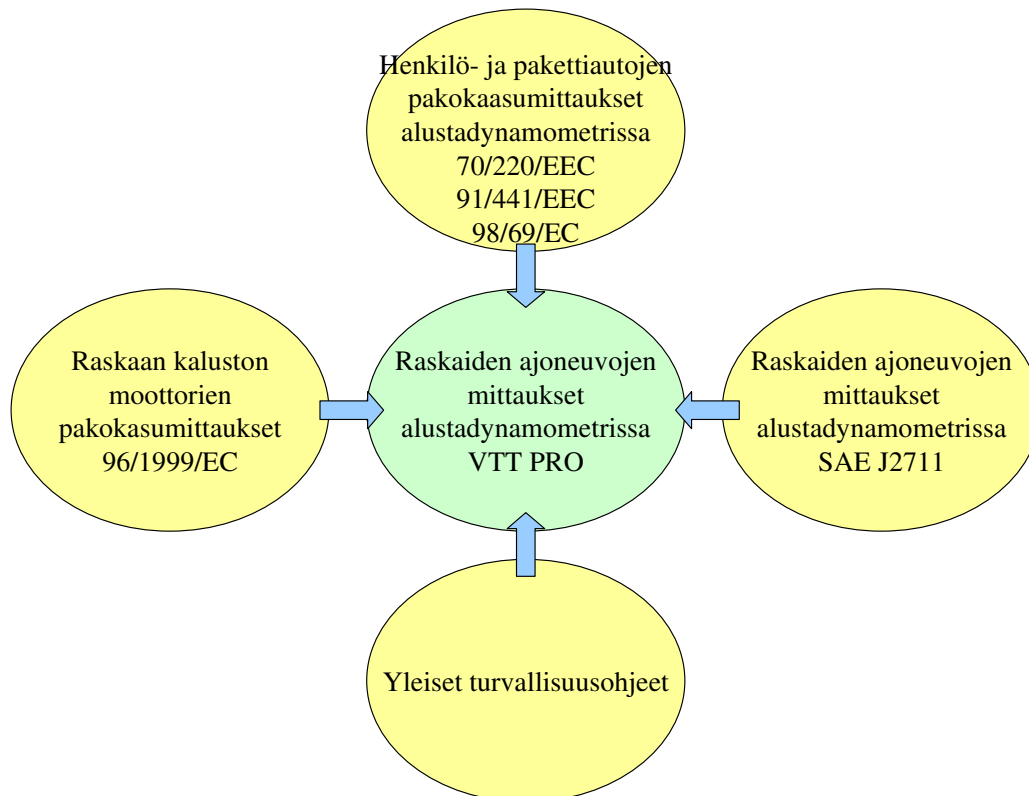
Froude Consinen valmistaman alustadynamometrin rullan halkaisija on 2,5 metriä, ja sen tehon vastaanottokyky (jatkuva) on 300 kW. Dynamometri on varustettu erittäin nopealla

säätöjärjestelmällä ja sähköisellä inertian simuloinnilla mahdollistaen dynaamisen testauksen (transienttitestauksen). Inertian simulointi on säädettävissä alueella 2.500 – 60.000 kg.

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 henkilöautojen alustadynamometrimittausten tai transienttityyppisten ETC –moottorimittausten osalta.

VTT:llä tunnistettiin tarve luoda raskaiden ajoneuvojen alustadynamometrimittauksiin hyväksytty mittausmenetelmä. Niinpä VTT kehitti oman, olemassa oleviin elementteihin perustuvan mittausmenetelmänsä. Näitä elementtejä ovat henkilö- ja pakettiautojen pakokaasumittaukset alustadynamometrissa (70/220/EC), transienttityyppinen ETC –pakokaasusertifiointi raskaille ajoneuvomoottoreille (1999/96/EC) ja amerikkalainen suositus ”Recommended Practice for Measuring Fuel Economy and Emissions of Hybrid-Electric and Conventional Heavy-Duty Vehicles” (SAE J2711). VTT:n mittausmenetelmän elementit on esitetty kuvassa 1.

Menetelmä kattaa sekä pakokaasumittaukset että polttoaineen kulutuksen mittaukset. Kesäkuussa 2003 Mittatekniikan Keskus MIKES myönsi VTT:n menetelmälle akkreditoinnin (T125, VTT:n oma mittausmenetelmä, koodi MK02E).



Kuva 1. VTT akkreditoitun raskaiden ajoneuvojen alustadynamometrimittauksen elementit.

Aikaisempi busseihin kohdistunut mittaustoiminta on esitelty mm. raporteissa ” Bussikaluston pakokaasupäästöjen evaluointi: Yhteenvetoraportti 2002 – 2004”, ”Bussikaluston pakokaasupäästöjen evaluointi: Vuosiraportti 2005” ja ”Transit Bus Emission Study: Comparison of emissions from diesel and natural gas buses”. RASTU –hanke on esitelty Motiva OY:n verkkosivuilla osoitteessa www.rastu.fi.

3 Koeohjelma ja menetelmät

Vuosi 2006 oli uusien Euro 4 määräysten voimaan tulon myötä eräänlainen käännekohta uusien raskaiden ajoneuvojen päästöissä. Vaikka uusien autotyyppien oli tullut täyttää Euro 4 raja-arvot jo vuotta aiemmin (1.10.2005), alkoi Euro 4 autojen myynti todenteolla vasta siirtymäajan jälkeen lokakuussa 2006, jolloin kaikkien uusina myytävien autojen tuli täyttää ko. uudet päästönormit.

Vuonna 2006 keskityttiin näin ollen pääosin uusien Euro 4 ja Euro 5 autojen mittaamiseen. Mukaan kuitenkin otettiin vielä aiempina vuosina (2002-2005) seurannassa olleet kaksi ajoneuvoyksilöä, diesel-käyttöiset Euro 2 ja Euro 3 autot.

Euro 2 seuranta-auton mittaukset toimivat samalla lähtötasomittauksina jälkiasennettavan partikkelikatalysaattorin seurannalle. Koska autoyksilön päästöhistoria oli hyvin tiedossa, nähtiin yksilö mitä sopivimmaksi partikkelikatalysaattoridemonstraatiolle (lyh. PDPF – Partial Diesel Particulate Filter).

Vuoden 2006 aikana mittauksissa kävi yhteensä 9 autoyksilöä, joiden tiedot on kerätty taulukkoon 1. Mittausmatriisi sisältää 2 seuranta-autoa, 5 uutta Euro 4 autotyyppiä sekä 3 mittausta jälkiasennetuilla ”Retrofit” järjestelmillä. Lisäksi mukaan otettiin vuosimallin 1999 Euro 2 auto, jota käytettiin RASTU-projektin menetelmäkehityksessä. Yhtä poikkeusta (Brand C Euro 4 3-aks.) lukuun ottamatta kaikki autot olivat kaksiakselisia.

Merkin A Euro 2 –auto vm. -00 mitattiin alkuperäisen hapetuskatalysaattorin lisäksi myös jälkiasennetulla partikkelikatalysaattorilla. Mittaukset tehtiin sekä uudella puhdistimella että puhdistin lähes 30 tkm sisäänajettuna.

Taulukko 1. Mittausmatriisi 2006

Valmistekoodi	Päästötaso	Vuosimalli	Ajokilometrit	Pakok. jälkikäsitely	Luokitus
Brand A	Euro 2	1999	630429	Hapetuskat.	Menetelmäkehitys
Brand A	Euro 2	2000	433631	Hapetuskat.	Seuranta
Brand A	Euro 2	2000	433675	POC	Retrofit POC uusi
Brand A	Euro 2	2000	461000	POC	Retrof. POC sis.ajet.
Brand C	Euro 3	2002	560256	Hapetuskat.	Seuranta
Brand A	Euro 4	2006	13525	SCR	Uusi ajoneuvo
Brand B	Euro 4	2006	10896	SCR	Uusi ajoneuvo
Brand C	Euro 4	2006	101888	EGR	Uusi ajoneuvo
Brand G	Euro 4	2006	993	SCR	Uusi ajoneuvo
Brand C	Euro 4	2006	28204	EGR	Uusi ajoneuvo, 3-aks.
Brand A	Euro 2	1997	554220	SCR+CRT	Retrofit

Mittauksissa käyneet uudet Euro 4 -autot, Brand C vm. 2006 lukuun ottamatta, osallistuivat myös Suomen Paikallisliikenneliiton (PLL) teettämiin kaupunkibussien vertailumittauksiin. Vertailumittauksissa kiinnitettiin päästöjen lisäksi erityistä huomiota mm. polttoaineen kulutukseen. PLL:n projektin tutkimusraportti on ladattavissa osoitteesta:

<http://virtual.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2007/T2372.pdf>

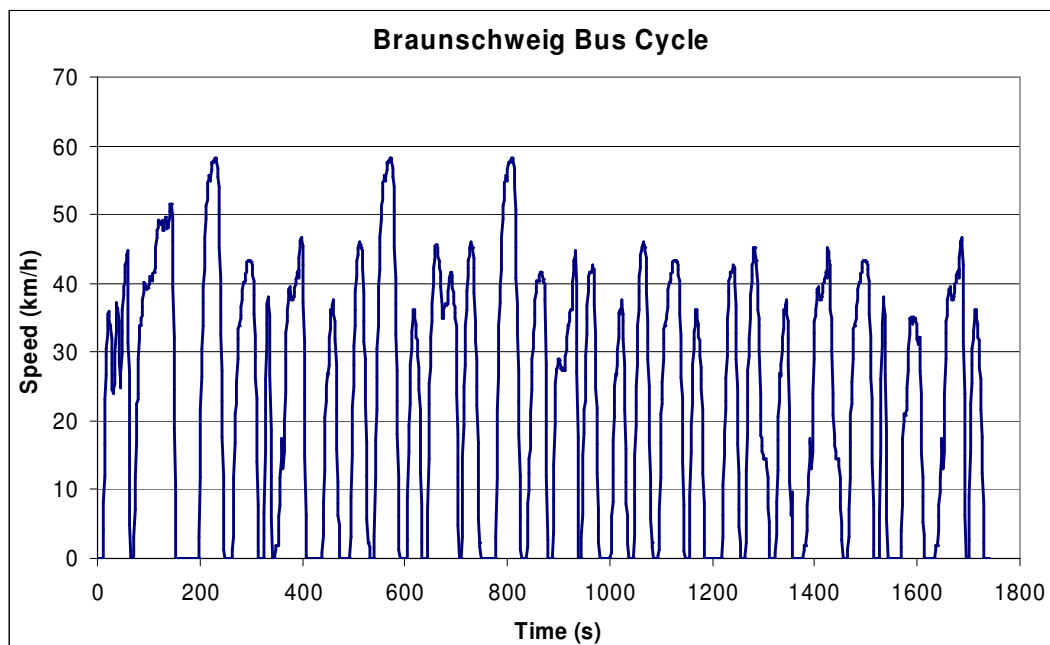
Mikäli PLL:n ja tämän raportin tuloksia tarkastellaan ristiin, on huomioitava että PLL:n projektissa mittaukset on tehty n. ¼ -kuormaa simuloiden, kun RakeBus ja RASTU – projekteissa simulointimassana on yleisesti pidetty ½ -kuormaa.

Taulukon viimeinen ajoneuvo, jälkiasennetulla SCR + CRT –järjestelmällä varustettu ajoneuvo puolestaan osallistui YTV:n teettämään retrofit selvitykseen, josta tarkemmin osoitteessa: http://www.ytv.fi/NR/rdonlyres/AEED1695-C64C-4131-AAA6-3BD2C445D1EF/0/Retrofit_YTV_rap_lopullinen.pdf

3.1 Projektikohtaiset mittausmenetelmät

Kaikki mittaukset tehtiin VTT:n raskaan ajoneuvokaluston tutkimuslaboratoriossa. Muiden projektien yhteydessä VTT on tehnyt eri tyyppisille autoille ns. rullauskokeita (coast-down) ajovastusyhtälöiden määrittelemiseksi. Näitä yhtälöitä käytettiin nyt hyväksi ajovastusten asettelussa (mm. ajoneuvon massan vaikutus). Dynamometrin säätöjärjestelmä mahdollistaa käytännössä minkä tahansa ajoneuvon ajovastusten simuloinnin. Koematriisiin kuului sekä kaksi- että kolmiakselisia busseja. Pääosa autoista oli kuitenkin tavallisia kaksiakselisia kaupunkibusseja. Kaikki ajoneuvot mitattiin simuloimalla ajoneuvon puolikuorma (ajoneuvoyksilön omamassaan lisätynä 50 % auton kantavuudesta).

Alustadynamometrikokeen aikana kuljettaja seuraa annettua nopeus/aikaprofiilia, eli ajosykliä. Kaikki autot ajettiin Braunschweig –bussisyklillä. Kuvassa 2 on esitetty Braunschweig –syklin nopeuskuvaaja ajan funktiona. VTT on todennut, että Braunschweig –sykli vastaa kohtuullisen hyvin ajoa Helsingin ydinkeskustassa.



Kuva 2. Braunschweig bussisyklin (BSC) nopeuskuvaaja ajan funktiona.

Kaikista autoista mitattiin säännellyt päästöt (CO, THC, NO_x, PM) käyttämällä täyden virtaaman CVS- järjestelmää (Pierburg CVS-120-WT) ja siihen liitettyä analysaattorijärjestelmää (Pierburg AMA 4000). Laitteistot täyttävät Direktiivin 1999/96/EC vaatimukset raskaiden ajoneuvomoottorien pakokaasumittauksissa käytettävistä mittalaitteista. Alustadynamometrimittausten osalta päästöarvot suhteutettiin ajomatkaan, eli päästökertoimen ovat muodossa g/km.

4 Tulokset ja tulosten arviointi

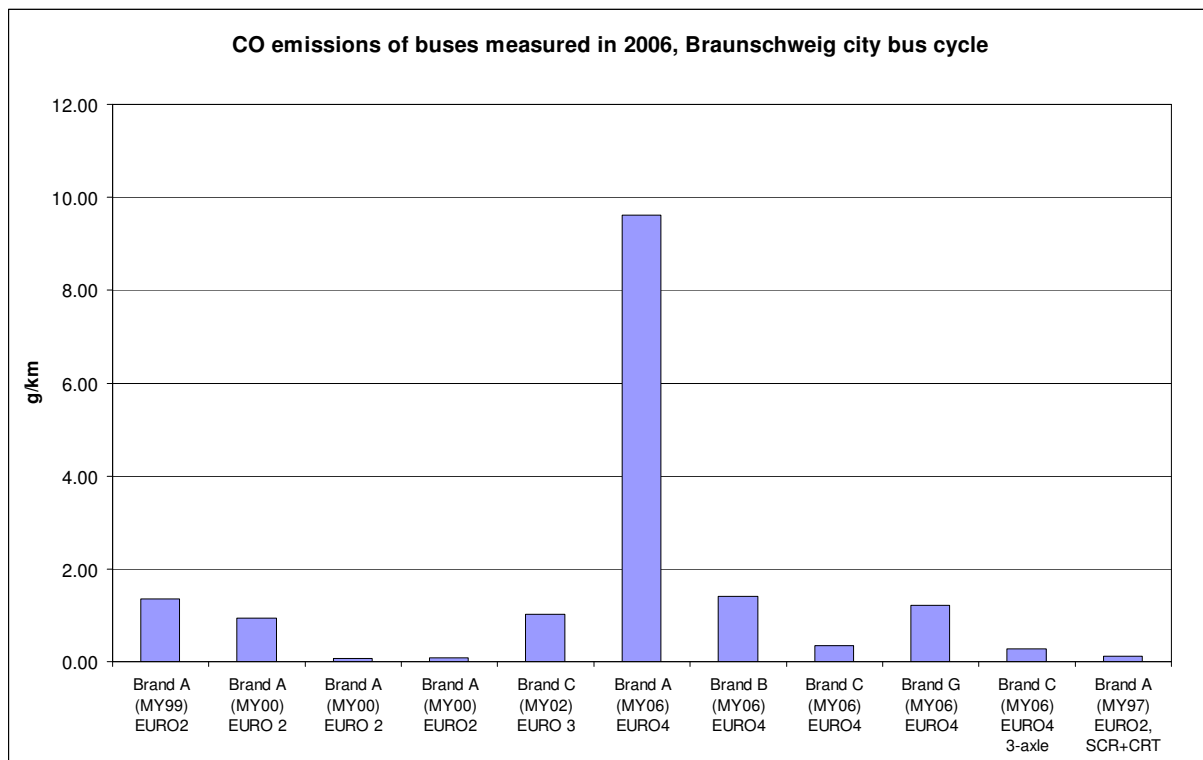
4.1 Vuoden 2006 uudet tulokset

Tyypillisesti dieselmoottorien CO ja THC päästöt ovat matalia, joten niihin ei yleensä kiinnitetä suurtakaan huomiota. Kyseiset päästökomponentit eivät myöskään yleensä tuota ongelmia dieselmoottorien päästöjen hyväksyntämittauksissa. Hapetuskatalysaattorien käyttö lisäksi vähentää CO ja THC päästöjä entisestään. Yllätys oli, että SCR –teniikka voi tuottaa sängen korkeita CO –päästöjä.

Pakokaasulainsäädännön kiristyessä haastavimmat päästökomponentit ovat olleet typen oksidit (NOx) ja partikkelit (PM). Molemmat komponentit ovat ongelmallisia dieselmoottoreille, sillä optimoitaessa moottorin säätöjä toisen komponentin suhteen, toinen komponentti vastavuoroisesti nousee.

CO päästöissä suurimmat lukemat saatiin SCR-järjestelmällä varustetusta Brand A Euro 4 autosta. SCR auto päästi häkää jopa 9.6 g/km, kun kaikki muut diesel- ja maakaasuautot jäivät alle 2 g/km arvoihin (kuva 3).

Vuoden 2005 mittauksissa havaittiin myös vastaava poikkeuksellisen korkea CO-lukema (8.6 g/km) toisesta SCR-järjestelmällä varustetusta saman merkkisestä mutta eri tyyppisestä autosta.



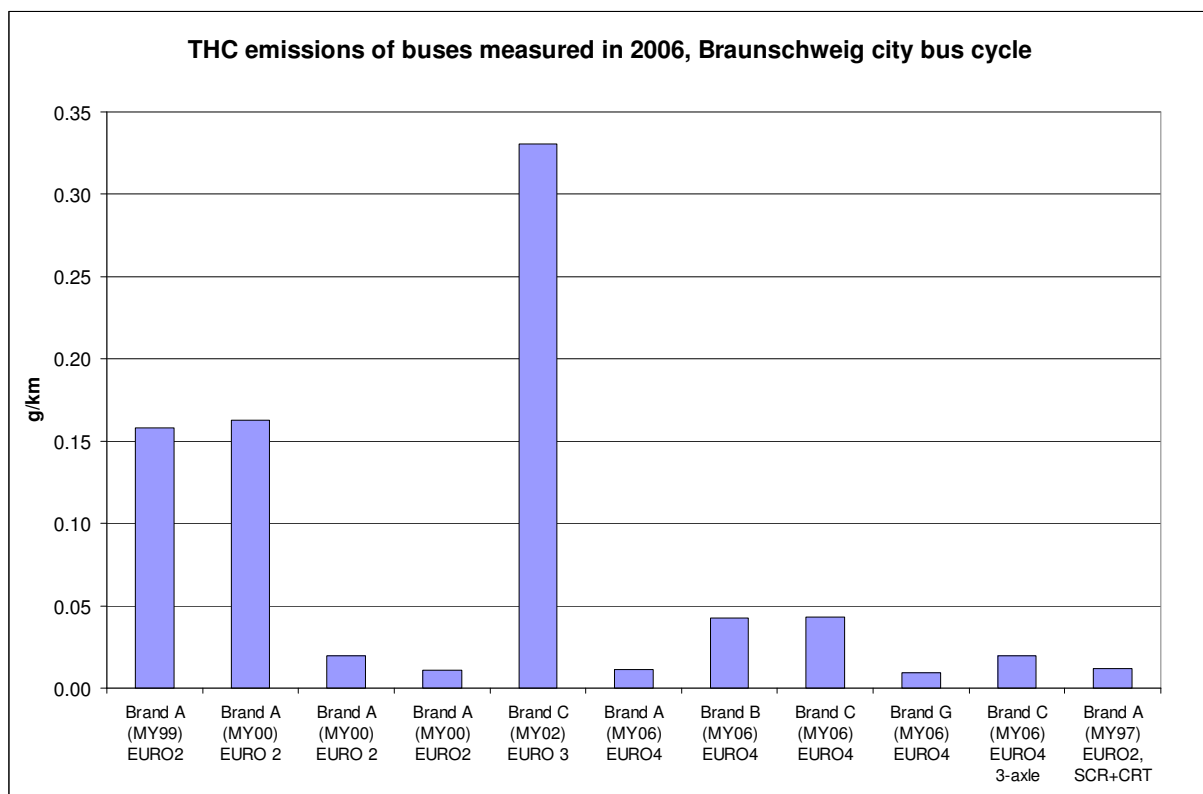
Kuva 3. Kaupunkibussien häkäpäästöt (CO-päästöt)

Kahdessa muussa SCR-tekniikkaan perustuvassa Euro 4 autossa (Brand B ja Brand G), CO-päästöt sen sijaan olivat diesel-kalustolle tyypillisellä tasolla (1.2 – 1.4 g/km), vaikkakin korkeammasta päästä.

Kuvan 3 kaksi matalampaa Euro 2 auton CO-tulosta (Brand A), ovat seurausta jälkiasennetusta partikkelikatalysaattorista. Tästä enemmän kappaleessa 4.2 Seuranta-autot ja PDPF. Myös jälkiasennetulla SCR+CRT-järjestelmällä varustetun auton tulokset ovat erittäin matalat.

Hiilivety (THC) –päästötuloksissa joukosta erottui Euro 3 -seuranta-auto Brand C vm.02 (kuva 4). Nyt mitattu lukema 0.33 g/km on huomattavasti korkeampi kuin mitä hapetuskatalysaattorilla varustetuilta Euro 3 autoilta odotetaan. Todennäköisesti auton katalysaattori on menettänyt puhdistustehonsa. Kyseinen autoyksilö on mukana myös seurannassa, josta enemmän kappaleessa 4.2.

Toiseksi korkeimmat THC-tulokset (0.16 g/km) mitattiin kahdesta Brand A Euro 2 –autosta, vuosimallit 1999 ja 2000. Myös nämä tulokset kielivät katalysaattorin tehon heikkenemisestä, mikä sinällään on tyypillistä kyseisen ikäluokan autoille. Myös THC-päästökuvassa (kuva 4) näkyy selvästi jälkiasennetun partikkelikatalysaattorin vaikutus (Brand A MY00 Euro 2).

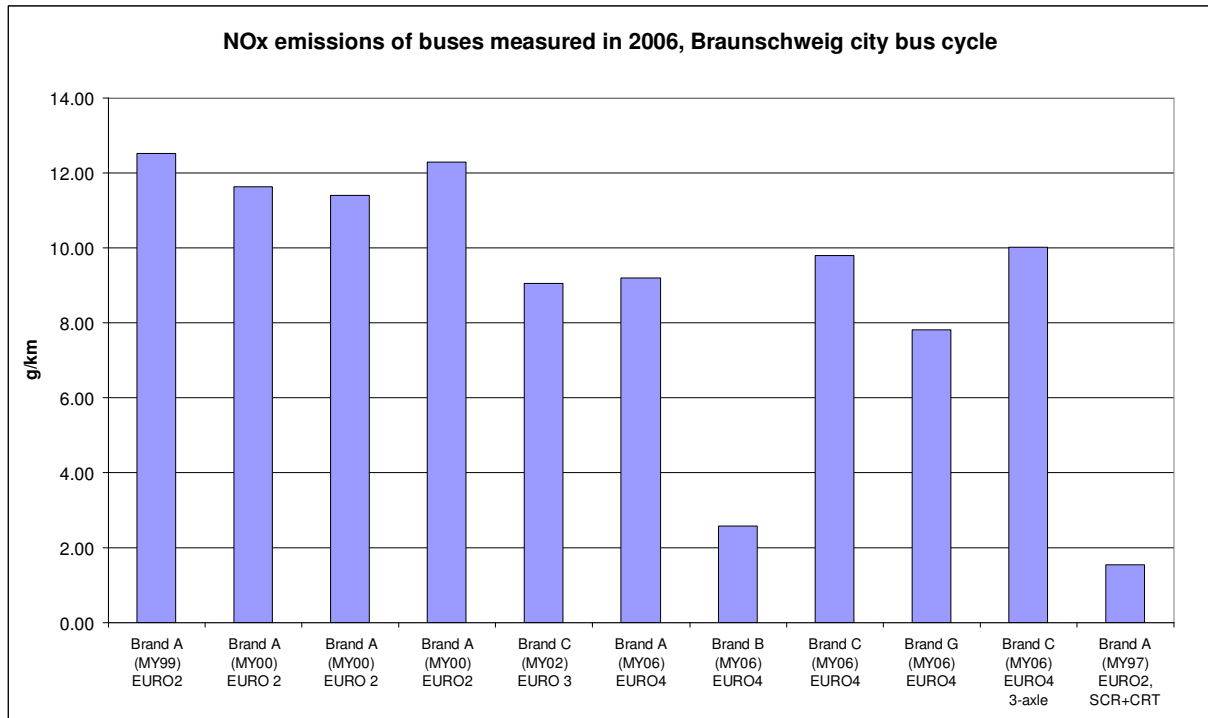


Kuva 4. Kaupunkibussien (kokonais)hiilivetyypäästöt (THC-päästöt)

Typen oksidi (NOx) –tuloksissa Euro 2 ja Euro 3 -autojen päästöt vahvistivat aikaisempien vuosien mittauksia. Molemmissa päästöluokissa nyt mitatut tulokset olivat lähellä päästötietokannan keskiarvoja, jotka ovat Euro 2 –autoille 13.6 g/km ja Euro 3 autoille 8.8 g/km. Päästötietokannasta on kerrottu enemmän kappaleessa 4.3.

Euro 4-autot sen sijaan yllättivät. Merkkien A ja C NO_x-tulokset olivat jopa 9.2 - 10 g/km, eli selvästi Euro 3 autojen keskiarvoa korkeammat. Merkki A käyttää SCR-tekniikkaa, kun taas merkki C edustaa EGR-tekniikkaa. Kumpikaan tekniikka ei siis toiminut näissä tapauksissa odotetusti. Merkin G (SCR) NO_x-päästöt (7.8 g/km) jäivät alle Euro 3 keskiarvon, mutta olivat silti huomattavasti Euro 4 autoilta odotettua tasoa korkeammat (kuva 5).

Merkin B SCR-järjestelmällä varustettu Euro 4 auto puolestaan antoi SCR-autolta odotetut matalat NO_x-päästöt (2.6 g/km). Kuvasta 5 erottuu myös edukseen jälkiasennetulla SCR+CRT järjestelmällä varustettu Merkin A Euro 2 auto, jonka tulos oli vain n. 1.5 g/km.

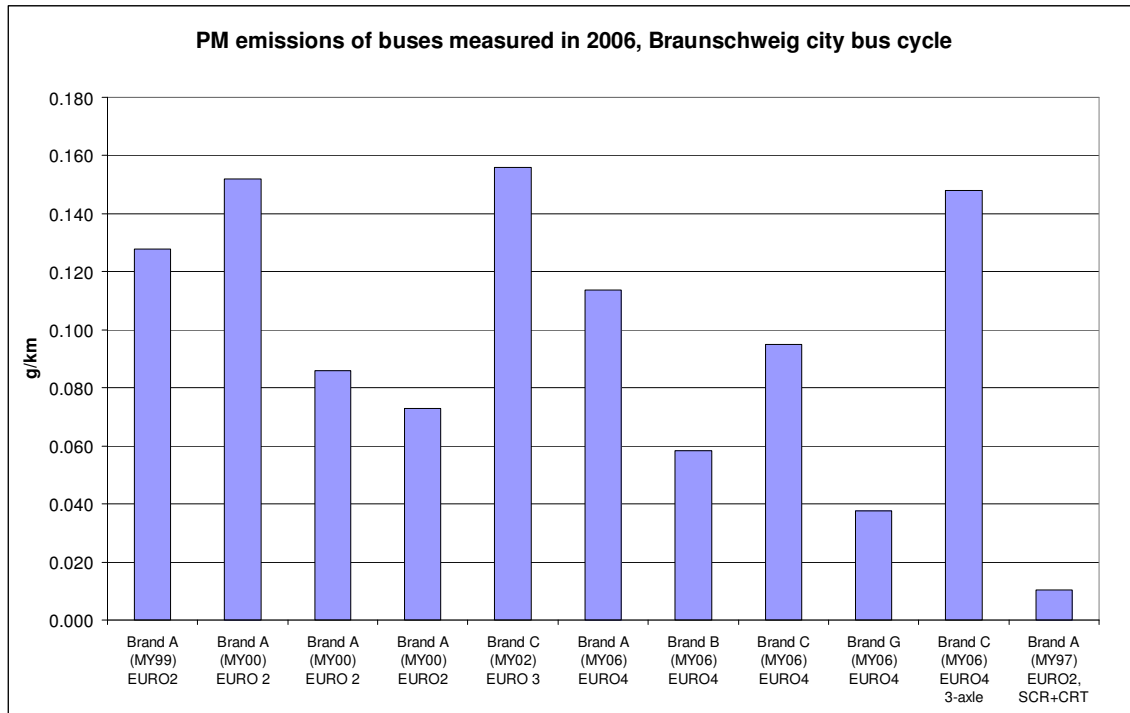


Kuva 5. Kaupunkibussien typpioksidipäästöt (NO_x-päästöt)

Myöskään partikkeli (PM) –päästöissä Euro 2 ja Euro 3 autot eivät tuottaneet yllätystä (kuva 6). Sen sijaan yllätyksiä tarjosivat jälleen uudet Euro 4 autot. Merkkien A ja C tulokset (0.95 g/km - 0.148 g/km) olivat alle Euro 3 keskitasoa, mutta kuitenkin ainoastaan samalla tasolla parhaiden VTT:llä mittauksissa käyneiden Euro 3 -autojen kanssa. Merkkien B ja G tulokset olivat PM-päästöissä huomattavasti edellisiä paremmat, 0.058 g/km ja 0.038 g/km.

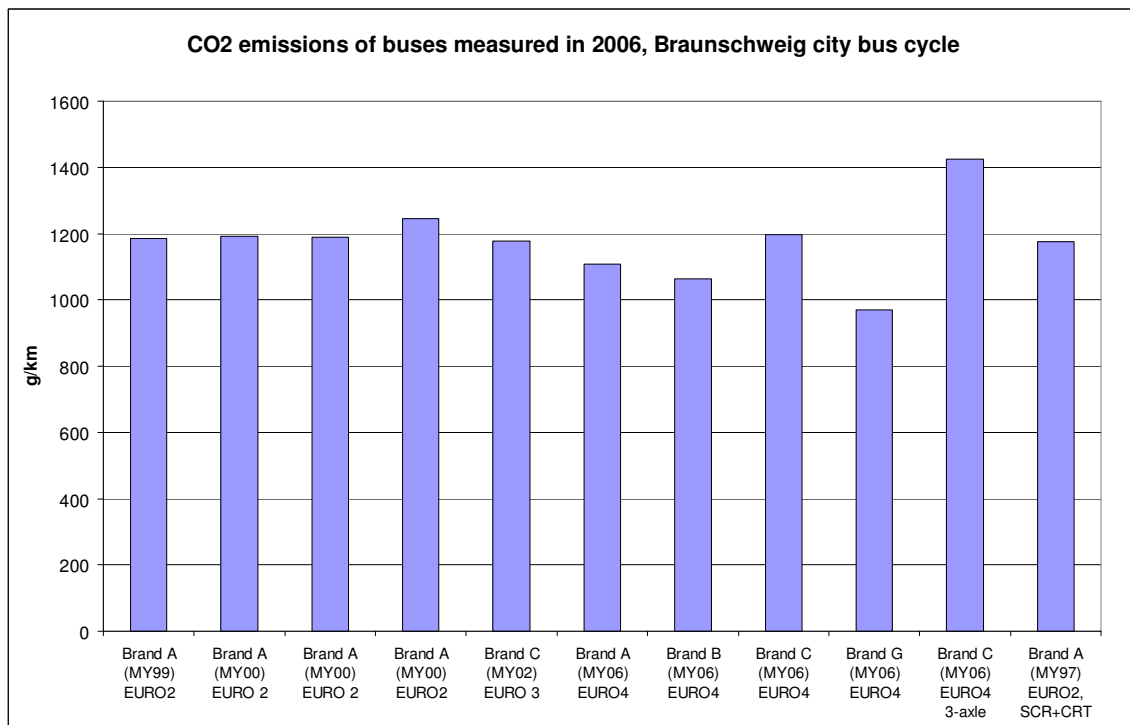
Euro 4 päästöraja-arvo on vain viidennes Euro 3 rajasta, joten partikkelipäästöjen olisi voinut olettaa putoavan huomattavasti enemmän. Tulosten vertailusta raja-arvoihin lisää kappaleessa 4.3.

Joukon pienimmän partikkelipäästön (0.010 g/km) tuotti jälkiasennetulla SCR-CRT –järjestelmällä varustettu vuosimallin 1997 Euro 2 -luokan ajoneuvo merkkiä A. Jatkuvasti regeneroituva partikkelisuodatin (CRT = Continuously Regenerating Trap) on tunnetusti tehokas laite partikkelien vähentämisessä. Haittapuolena CRT-suodattimen käytössä on mm. polttoaineenkulutuksen kasvu ja suodattimen tukkeutumisvaara. Tästä ja muista jälkiasennettavista pakokaasujen käsittelyvaihtoehdoista on löydettävissä enemmän tietoa mm. YTV:n retrofit-selvityksestä. (Nylund N-O 2005)



Kuva 6. Kaupunkibussien partikkelipäästöt (PM-päästöt)

Hiilidioksidi (CO₂) -päästöissä Euro 2 ja 3 autot olivat vuoden 2006 mittauksissa keskimäärin 1200 g/km. Euro 4 autojen osalta keskiarvo on hieman Euro 2 ja 3 autoja matalampi, luokkaa 1100 g/km (huomioitu muut paitsi Brand G). Brand G:n tulos poikkeaa joukosta auton kevyemmän rakenteen aiheuttaman kulutuseron vuoksi. 3-akselisen auton korkeampi kulutus näkyy myös luonnollisesti korkeampana CO₂-päästönä (kuva 7).



Kuva 7. Kaupunkibussien hiilidioksidipäästöt (CO₂-päästöt)

Huom! CO₂-päästöjen mittatarkkuus ei riitä autojen välisien kulutuserojen vertailuun. Vaikka SCR+CRT -retrofitjärjestelmällä varustetun auton CO₂ päästöt eivät mittatarkkuuden rajoissa

erotu saman merkin muista autoista, oli sen punnittu polttoainenkulutus kuitenkin n. 10% vertailuautoja korkeampi.

4.2 Seuranta-autot ja PDPF

Vuodesta 2002 alkaen on kaupunkibussien päästömittauksissa seurattu kahden dieselkäyttöisen kaupunkibussin päästöjen kehittymistä ajokilometrien ja ikääntymisen vaikutuksesta. Toinen seuranta-autoista edustaa tyypillistä Euro 2-autoa ja toinen vastaavasti Euro 3-autoa. Aikaisemmin seurannassa olleen Euro 3 CNG auton mittaaminen päätettiin jo vuonna 2005.

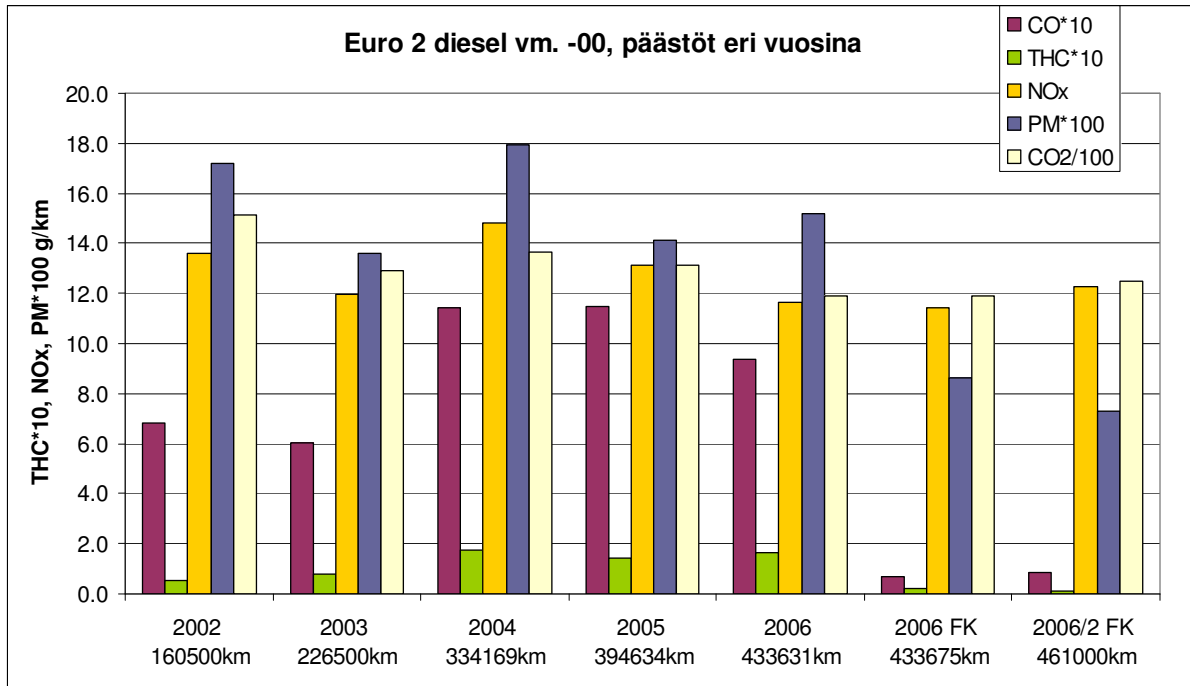
Pitkäaikaisseurannassa ollut Euro 2 auto varustettiin kesällä 2006 Finnkatalyitin toimittamalla hiukkaskatalyysaattorilla (PDPF, **P**artial **D**iesel **P**articulate **F**ilter). Vuoden 2006 mittaukset toimivat näin sekä perusseurannan loppumittauksina että PDPF-laitteen seurannan lähtötasomittauksina.

Kuvassa 8 on esitetty Euro 2 –auton päästöjen kehittyminen eri mittausvuosien ja ajokilometrien suhteen. Kaksi oikeanpuoleista pylväsryhmää ovat mittaustuloksia PDPF-puhdistin juuri asennettuna ja n. 30 tkm sisäänajettuna. Tulosten sovittamiseksi samaan kuvaan, on CO- ja THC-lukemat kerrottu kertoimella 10 ja PM lukemat kertoimella 100. (kuva 8)

Euro 2 auton CO-päästöt olivat seurannan alussa vuosina 2002 ja 2003 n. 0.6 - 0.7 g/km. Vuonna 2004, kun autolla oli ajettu yli 300tkm, CO-päästöjen huomataan nousseen lähes kaksinkertaisiksi lähtötasoon verrattaessa. CO-päästöt pysyivät tällä tasolla (0.9 – 1.1 g/km) myös seuraavat vuodet 2005 ja 2006. Samassa yhteydessä (2004) havaitaan vastaava muutos myös THC-päästöissä. Päästöt nousivat lukemista 0.053 - 0.077 g/km lukemiin 0.143 – 0.172 g/km, eli yli kaksinkertaisiksi. Molemmat havainnot kertovat hapetuskatalyysaattorin tehon merkittävästä ja pysyvästä heikkenemisestä (kuva 8)

Auton NOx-päästöt ovat ailahtelleet vuosien 2002 - 2006 aikana 11.6 - 14.8 g/km. Muutokset ovat merkittäviä, mutta mitään varsinaista syytä auton muuttumiselle ei ole tiedossa. Tuloksista ei myöskään ole nähtävissä selkeää trendiä, ei nousevaan eikä laskevaan suuntaan.

Myös partikkelipäästöt ailahtelevat, mutta selkeää trendiä ei ole niin ikään nähtävissä. Seurannassa partikkelipäästöt olivat 0.136 – 0.180 g/km.



Kuva 8. Euro 2 –auton seurantamittaukset 2002 – 2006. Viimeisenä vuonna 2006 autoon asennettiin partikkelikatalysaattori

Partikkelikatalysaattorin vaikutus näkyy selvästi kaikissa muissa mitatuissa päästökomponenteissa, paitsi NO_x-päästöissä. CO-päästöt tippuvat tasolle 0.68 – 0.83 g/km, THC-päästöt tasolle 0.11 - 0.19 g/km ja partikkelit tasolle 0.730 – 0.860 g/km. NO_x-päästöissä ei ole havaittavaa muutosta. PDPF vähensi (keskiarvo uuden ja sisäänajetun puhdistimen mittauksista) CO-päästöjä 88%, verrattuna vuosien 2002 – 2003 keskiarvoon, eli tilanteeseen missä alkuperäisen katalysaattorin puhdistusteho oli vielä hyvä. Verraten vuosien 2004 – 2006 mittauksiin, eli tasoon missä alkuperäisen katalysaattorin teho oli jo heikentynyt, saadaan vähenemäksi 93%. Puhdistustehokkuudet hiilivetyjen osalta olivat vastaavasti 77% ja 91%. Partikkelit puolestaan vähenivät näin verraten 48 - 50% (laitteen asennuksen yhteydessä mitattu välitön partikkelien vähenemä oli 43%). CO₂-päästöihin PDPF:llä ei ollut mitattavaa vaikutusta.

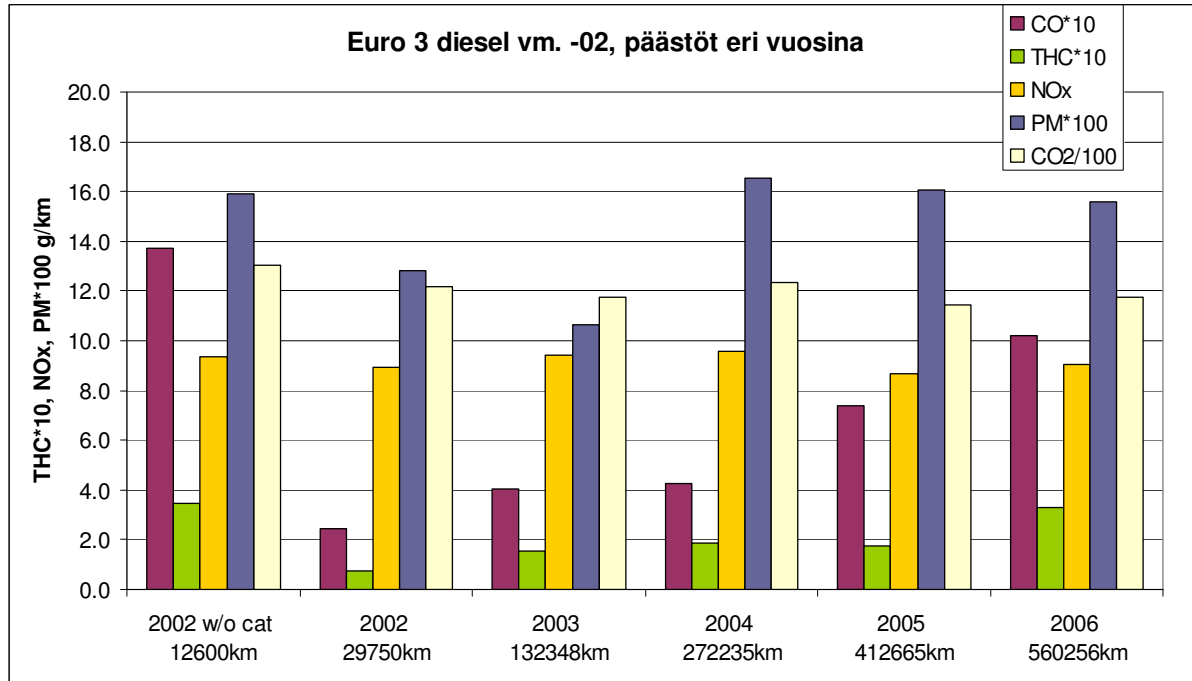
Partikkelikatalysaattorilla varustetun auton seuranta on tarkoitus jatkaa tulevien vuosien mittauksissa.

Toinen seurantakohte, vuosimallin 2002 Euro 3 auto, mitattiin ensimmäisen kerran vuonna 2002 ennen auton ensihuoltoa, jossa autoon asennettiin hapettava katalysaattori. Uudesta autosta ilman jälkikäsitteilylaitteistoa mitattiin CO-päästö 1.37 g/km, THC-päästö 0.344 g/km, NO_x-päästö 9.4 g/km ja PM-päästö 0.159 g/km. (kuva 9)

Samana vuonna auto mitattiin uudelleen vasta asennetulla hapetuskatalysaattorilla varustettuna ja nähtiin selvät leikkaukset CO- ja THC-päästöissä. CO-päästöt laskivat arvoon 0.24 g/km ja THC-päästöiksi mitattiin 0.08 g/km. Myös partikkelipäästöt laskivat lukemaan 0.123 g/km. Ajokilometrejä mittausten välillä ei ehtinyt kertyä kuin 17 tkm.

Vuosien 2003 tuloksesta nähdään, miten CO- ja THC -päästökomponenttien arvot nousivat heti ensimmäisen vuoden (tai 100tkm) aikana noin kaksinkertaiseksi vuoden 2002 uudella katalysaattorilla tehtyihin mittauksiin verraten. Vuonna 2004 CO- ja THC-päästöt pysyivät vakaina, mutta vuosien 2005 ja 2006 mittauksissa nähdään selvää päästömäärien kasvua.

Vuonna 2006 CO-päästöt ovat jo 1.02 g/km ja THC-päästöt 0.33 g/km. Molemmat päästölukemat ovat nyt kasvaneet vuodesta 2002 yli kolmikertaisiksi ja tasot alkavat olla samaa kuin lähtömittauksissa 2002. Aikaa muutokseen on kulunut siis neljä vuotta ja n. 500tkm.



Kuva 9. Euro 3 –auton seurantamittaukset 2002 - 2006

4.3 Päästötietokanta

VTT on muodostanut vuosien 2002 - 2006 aikana mittauksissa käyneiden kaupunkibussien tuloksista laajan päästötietokannan. Tietokannan perusteella voidaan mm. arvioida erilaisten kaupunkilinja-autojen todellisia päästöjä. Jako voidaan tehdä esim. Euro päästöluokittain, tai esim. käyttövoiman / tekniikan perusteella. Tietokanta antaa lisäksi vahvan referenssin, mihin uusien mittauksissa ensimmäistä kertaa käyviin autotyyppien tuloksia voidaan verrata.

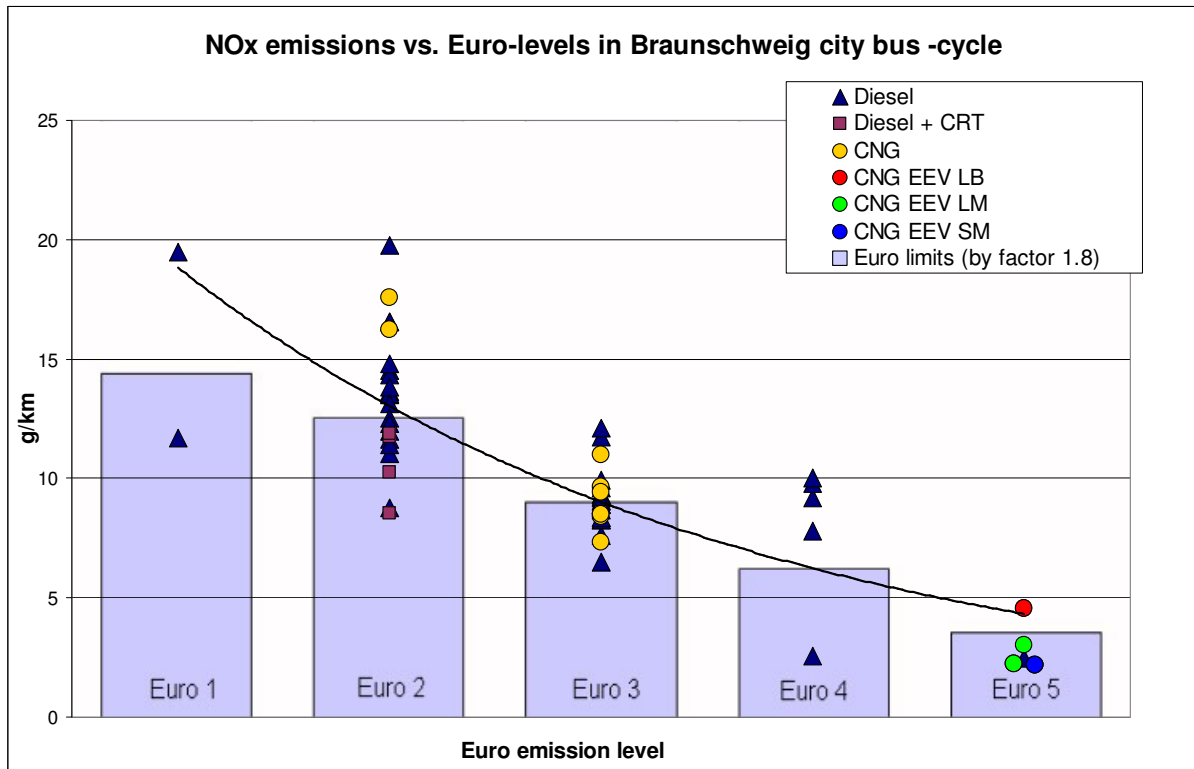
Kuvissa 10 – 11 on esitetty päästötietokannan NO_x- ja PM-tulokset erityyppisille autoille. Kolmiot ovat dieselautojen mittaustuloksia, ympyrät kaasautojen tuloksia ja neliöt CRT-puhdistimella varustettujen autojen tuloksia.

Taustalle piirretyt siniset pylväät kuvaavat Euro-rajaa kertoimella 1.8. Kerroin 1.8 perustuu Braunschweig-ajosyklissä moottorin tekemän työn ja ajetun matkan suhteeseen, ts. työtä kuluu ajosyklissä 1.8 kWh / km. Näin voimme arvioida mitattujen päästöjen suhtautumista Euro-päästörajaa-arvoihin.

Raja-arvoja voi näin menetellen kuitenkin pitää vain ohjeellisina, sillä moottorin kuormitus Braunschweig-ajosyklissä ei vastaa virallisen tyyppisyklin, ETC:n (European Transient Cycle), kuormitusta. Periaatteellisesti laki rajoittaa vain tietyssä sovitussa moottorin kuormitusykyssä syntyviä päästöjä, mutta ei ota kantaa todellisessa ajossa syntyviin päästöihin, joita tässä raportissa yksinomaan käsitellään.

Kaupunkibussien NO_x-päästöissä kehitys on keskimääräisesti sitä mitä EU:n päästörajoitusten tiukentumisen perusteella voisi olettaa. Euro 3 -tulosten osalta hajonta on huomattavasti Euro 2 -tulosten hajontaa vähäisempää. Tätä osaltaan selittää mm. tarkempiin ruiskutusjärjestelmiin siirtyminen.

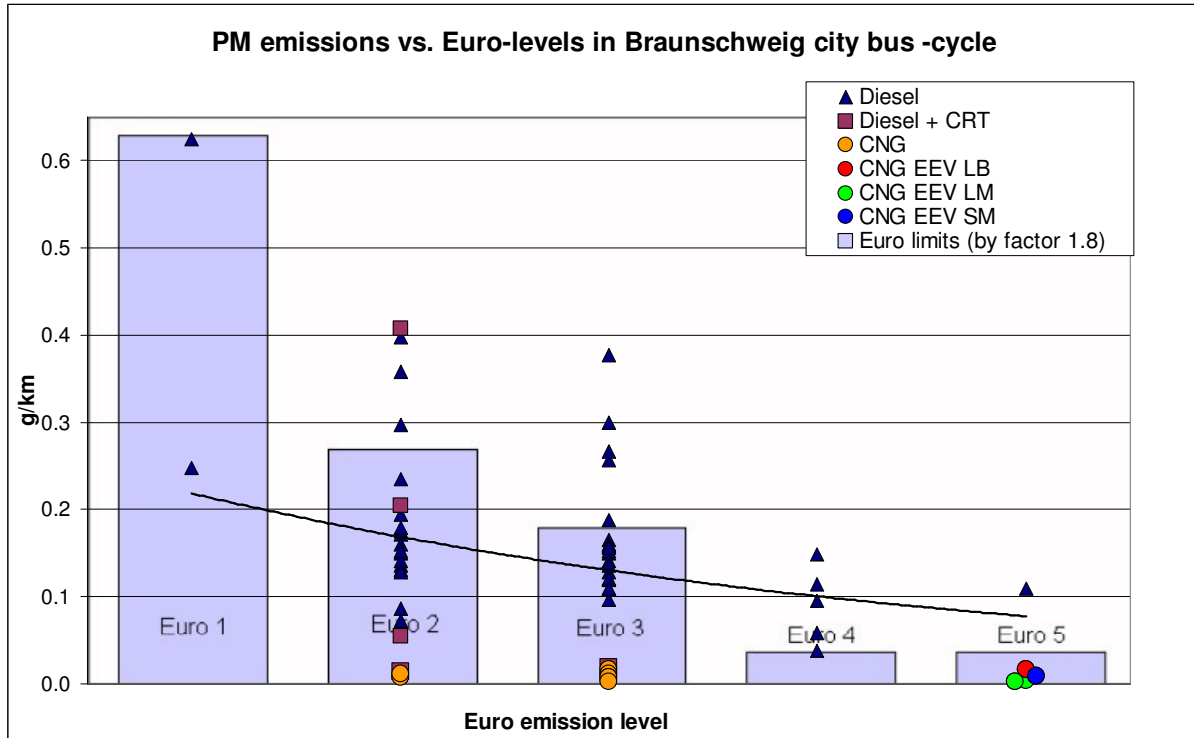
Euro 4 ja Euro 5 -autoista tähän mennessä saadut tulokset ovat varsin kaksijakoisia. Osa autoista on samalla NO_x-tasolla mitattujen Euro 3 autojen kanssa, vaikka rajat ovat laskeneet. Joukosta kuitenkin löytyy kaksi autotyyppiä, joiden tulokset vastasivat hyvinkin sitä mitä uusilta autotyypeiltä odotettiin. (kuva 10)



Kuva 10. Kaupunkibussien NO_x-päästöjen kehitys verraten päästörajoitusten kehitykseen

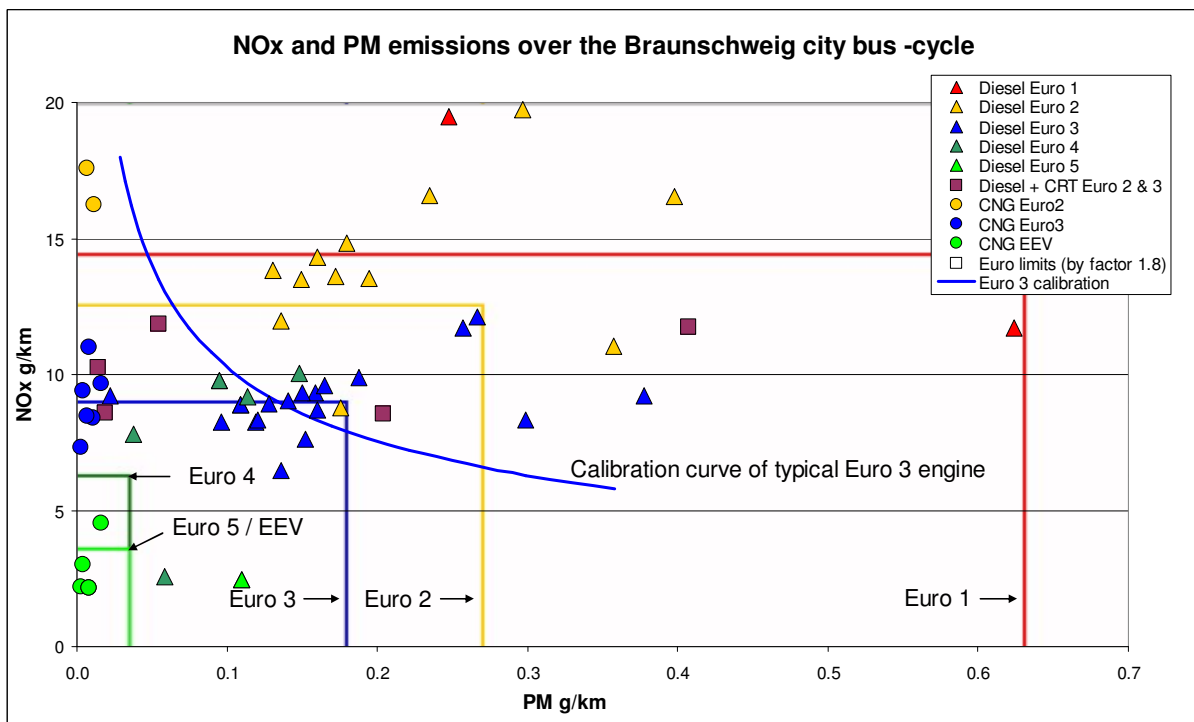
Partikkelipäästöissä (kuva 11) hajonta on kaikissa luokissa NO_x-päästöjä suurempaa. Autojen iästä riippumatta kaikki kaasukäyttöiset ja toimivat CRT-suodattimilla varustetut autot täyttävät tiukimmatkin partikkelipäästövaatimukset. Mittauksissa käyneistä CRT-suodattimilla varustetuista viidestä autosta kaksi toimi varsin mallikelpoisesti, kaksi ei lainkaan ja yksi osittain.

Uusista Euro 4/5 autoista yksi täyttää odotukset ja toinen on hyvin lähellä. Kaikki muut mittauksissa käyneet neljä autoa ylsivät vain samalle tasolle hyvien Euro 3 autojen kanssa.



Kuva 11. Kaupunkibussien PM-päästöjen kehitys verraten päästörajoitusten kehitykseen

Kuvassa 12, on esitetty tulokset NO_x-PM -graafina. Esitystapa antaa paremman käsityksen auton suorituskyvystä molempien parametrien suhteen. Sininen käyrä "Calibration curve" esittää Euro 3 moottorin säätöjen vaikutusta päästöihin. Moottori voidaan säätää edulliseksi joko NO_x- tai PM-päästöjen suhteen, mutta siirtyminen pienempiin arvoihin molempien komponenttien suhteen, vaatii teknisiä parannuksia.



Kuva 12. Kaupunkibussien päästöt NO_x-PM -kuvaajana

Kuten edellisistä kuvista havaitaan, saattavat autojen väliset erot molemmissa päästökomponenteissa olla varsin suuria, jopa saman autotyypin/päästöluokan sisällä. Suuri otos kuitenkin antaa selvän kuvan siitä, minne eri autotyyppien tulokset painottuvat ja mitä tietyn tyyppiseltä autolta voidaan odottaa.

4.4 Päästökertoimet

4.4.1 Kaksiakseliset kaupunkibussit

Mittauksissa käyneet autot ovat pääasiassa pääkaupunkiseudun liikenteestä ja edustavat näin ollen alueelle tyypillistä kalustoa. Myös merkkien osalta mittauksissa on painotettu alueen yleisimpiä malleja, kun taas vähemmistötyyppejä on otettu mittauksiin vain joitain yksilöitä. Näillä perusteilla VTT:n mittauksen keskiarvojen voidaan katsoa edustavan pääkaupunkiseudun kaupunkibussien todellisia päästöjä.

Liitteeseen 1 on kerätty mittauksissa käyneiden kaupunkibussien päästötuloksia automalleittain jaotellen. Mikäli autotyypin edustajia on käynyt mittauksissa useampia, on taulukkoon laskettu mittauksen keskiarvo. Myös saman autoyksilön mittaukset eri vuosina on laskettu mukaan keskiarvoon. Liite 1 sisältää automallikohtaiset päästötulokset myös kuvina. (Liite 1)

Taulukkoon 2 on kerätty keskiarvotulokset Euro-luokkien ja käyttövoiman perusteella jaoteltuina. Taulukon tulokset pätevät kaksiakselisen kaupunkibussille keskusta-ajossa.

Euro 5 tulokset eivät muista poiketen perustu mittauksiin, vaan ne on arvioitu Euro 4-tulosten perusteella, liian pienen Euro 5 autojen otannan vuoksi. Koska teknisesti Euro 5 autot ovat hyvin samanlaisia kuin Euro 4-autot, on niiden päästöt arvioitu Euro 4-autoja vastaaviksi, sillä erotuksella että NO_x-päästöt on merkitty päästörajoitusten tiukentumisen suhteessa pienemmiksi (muut päästörajat ovat samat molemmille Euro-luokille). Euro 4:n NO_x raja on 3.5 g/kWh ja Euro 5:n raja 2.0 g/kWh.

Taulukko 2. Kaksiakselisten kaupunkibussien päästökertoimet keskusta-ajossa

Braunschweig	CO g/km	HC g/km	CH ₄ * g/km	NO _x g/km	PM g/km	CO ₂ g/km	CO ₂ ekv** g/km	Kulutus kg/100km	Kulutus MJ/km
Diesel Euro 1	1.39	0.32	0.00	15.59	0.436	1219	1219	38.6	16.4
Diesel Euro 2	1.55	0.20	0.00	13.56	0.218	1281	1281	40.9	17.4
Diesel Euro 3	0.76	0.13	0.00	8.78	0.201	1196	1196	38.1	16.2
Diesel Euro 4	3.79	0.03	0.00	7.19	0.089	1123	1123	36.5	15.5
Diesel Euro 5***	3.79	0.03	0.00	4.11	0.089	1123	1123	36.5	15.5
CNG Euro 2	4.32	7.12	6.76	16.92	0.009	1128	1283	42.1	20.1
CNG Euro 3	0.18	1.33	1.26	10.02	0.009	1254	1284	45.8	21.9
CNG EEV	1.53	0.97	0.92	2.76	0.007	1230	1249	45.7	21.8

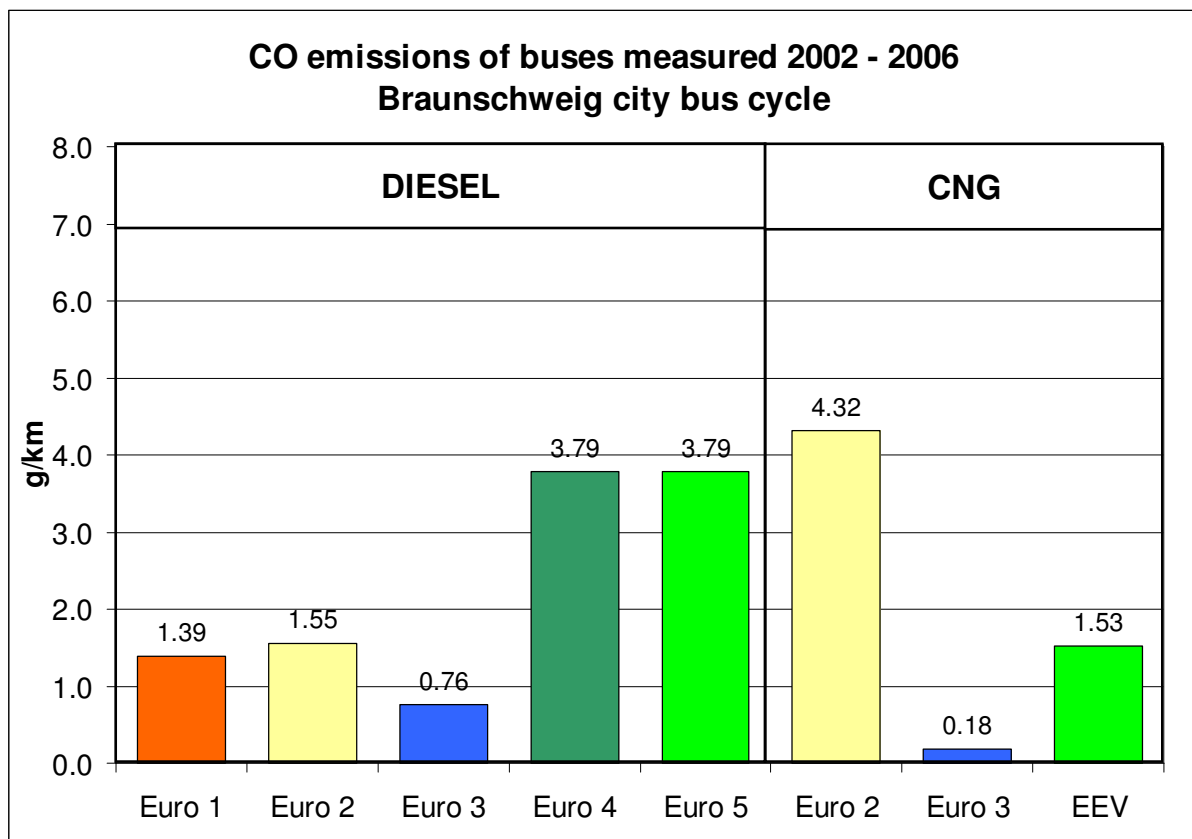
*Maakaasuautoille käytetty CH₄ = THC * 0.95, dieselille CH₄ = 0
 ** CO₂ ekv = CO₂ + 23 * CH₄
 *** Euro 5 tulokset arvioitu Euro 4 tulosten perusteella

Taulukossa 2 on käytetty maakaasuautojen metaani(CH₄)-päästöinä 95%:ia mitatuista kokonaishilivedyistä (THC). Dieselkäyttöisten autojen metaanipäästöt on arvioitu nolliksi. CO₂ ekvivalentissa on otettu huomioon metaanin hiilidioksidiin verraten 23-kertainen kasvihuonevaikutus (100 vuoden aikaperspektiivillä) (IPCC 2001).

Kuvissa 13 – 14 ja 16 – 18 on esitetty taulukon 2 päästökertoimet päästökomponenteittain. Euro 1-3 diesel-autojen CO-päästökertoimiin (kuva 13) vaikuttaa merkittävästi autoyksilöiden katalysaattorien kunto. Kaikissa tapauksessa ei voida edes olla varmoja, onko autossa yleensäkin koko katalysaattoria. Kuten kappaleen 4.2 seuranta-autojen tuloksista nähtiin, voidaan CO-päästöjen olettaa nousevat katalysaattorien ikääntyessä. Euro 3 autojen katalysaattorit toimivat vielä, mutta vanhempien yksilöiden katalysaattorien teho saattaa olla jo merkittävästi heikentynyt.

SCR –tekniikka näyttäisi lisäävän CO –päästöjä. Hajonta Euro 4 -autojen (CO-)päästöissä malleittain oli suuri, vaikka kaikki mittauksissa käyneet autot olivat uusia, eikä ikääntymisellä näin ollen ollut vaikutusta. Pienin Euro 4-autojen CO-päästö oli 0.35 g/km ja suurin 9.62 g/km.

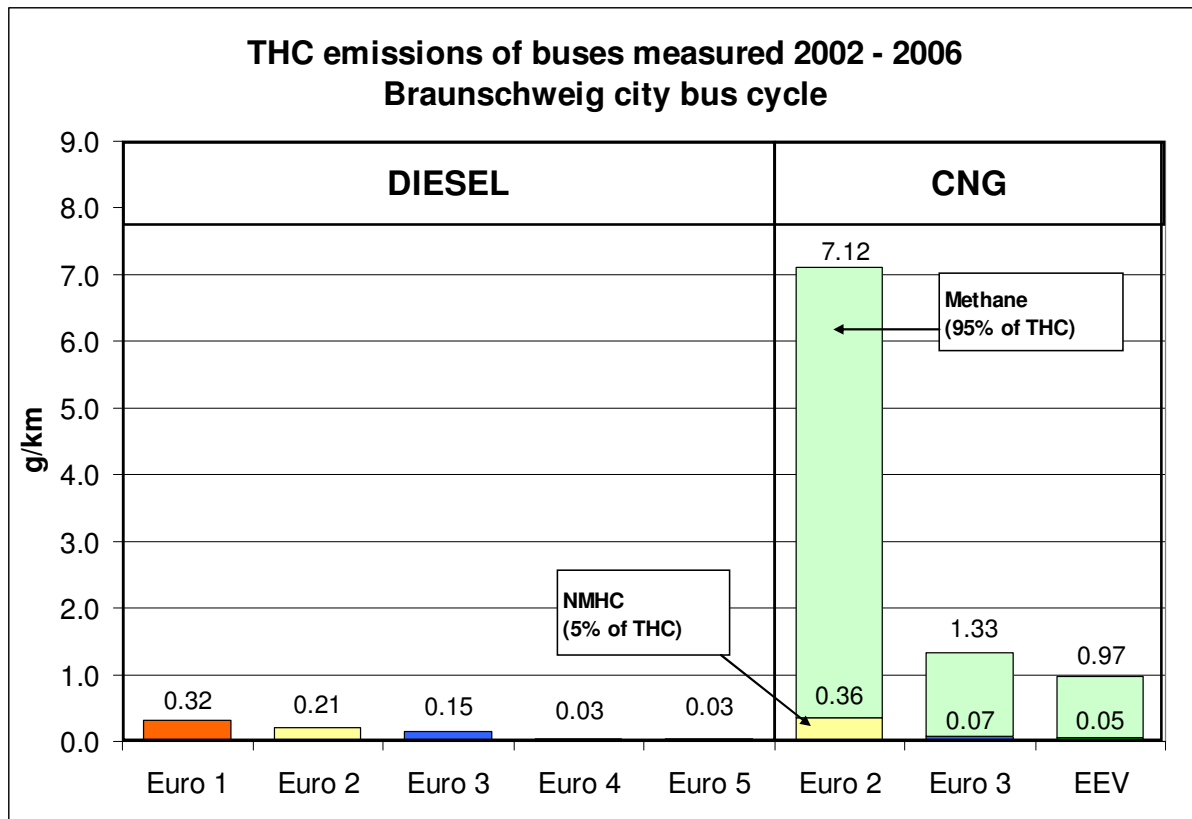
Todennäköinen syy vanhempien maakaasuautojen korkeaan CO-päästöön on niiden hapetuskatalysaattorien heikkeneminen. Euro 3 autojen katalysaattorit puolestaan ovat toimineet tulosten perusteella varsin tehokkaasti. EEV-maakaasuautojen tuloksissa on merkittävää hajontaa. Eri valmistajat käyttävät EEV-autoissaan eri tekniikoita. Otoksessa on mukana sekä laihaseosteisella että stoikiometrisella palotapahtumalla toimivia autoja. Yksi EEV autotyyppi lisäksi käytti molempia tekniikoita ajotilanteesta riippuen.



Kuva 13. CO-päästökertoimet (g/km) eri autoluokille (2-akseliset)

Mekaanisesti hyvässä kunnossa olevan maakaasuauton hiilivetypäästöistä suurin osa on palamatta jäänyttä metaania. Aikaisemmassa RakeBus-projektin maakaasu- ja dieselautojen vertailussa mitattujen maakaasuautojen metaanin osuudeksi kokonaishiilivedyistä määriteltiin jopa 98%. (Nylund & al. 2004)

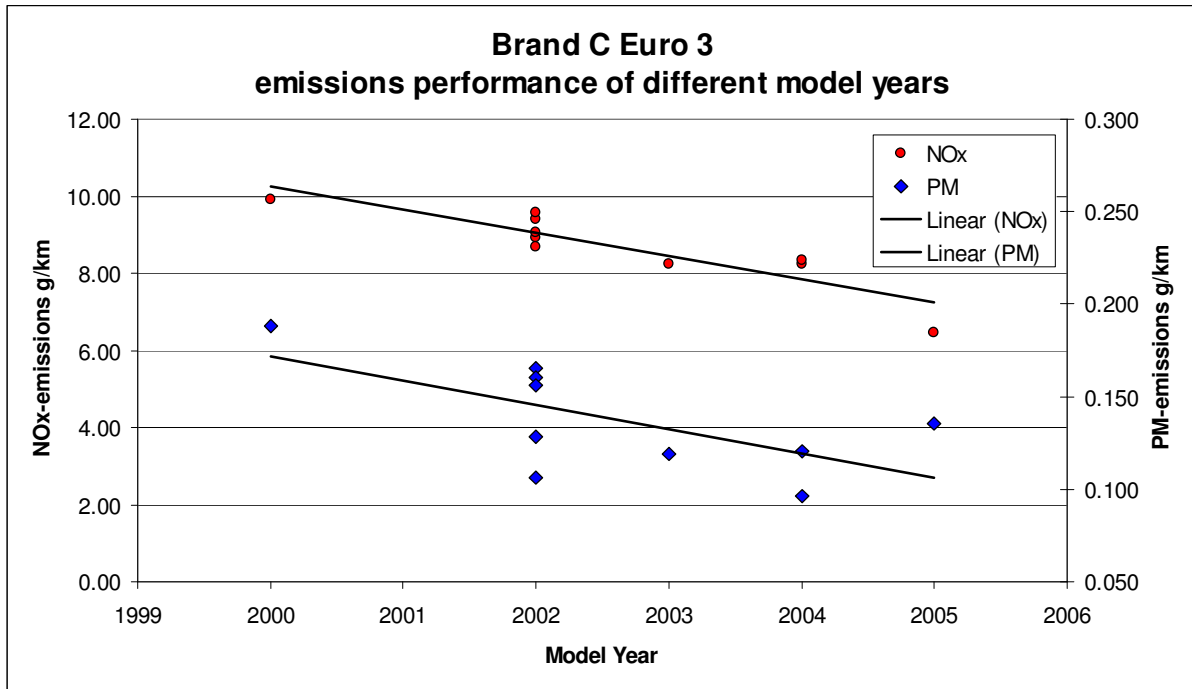
Em. maakaasu vs. diesel –vertailussa kaikki autot olivat uusia ja hyväkuntoisia. Vanhetessa on mahdollista että maakaasuauton ei metaaniset hiilivety päästöt (NMHC) kasvavat öljynkulutuksen kasvaessa. Tästä syystä metaanin osuutena on tässä raportissa käytetty arvoa 95% kokonaishiilivedyistä. Tuloksissa näkyy näin ollen suurempi osuus NMHC-päästöjä, mikä on epäedullisempaa maakaasuautoja kohtaan. Kuvassa 14 on esitetty kokonaishiilivety päästöt ja maakaasuautojen osalta metaanin osuus on eriteltyinä.



Kuva 14. THC-päästökertoimet (g/km) eri autoluokille. Kaasuautojen metaanipäästöt eritelty kokonaishiilivedyistä 95%;n suhteella. (2-akseliset)

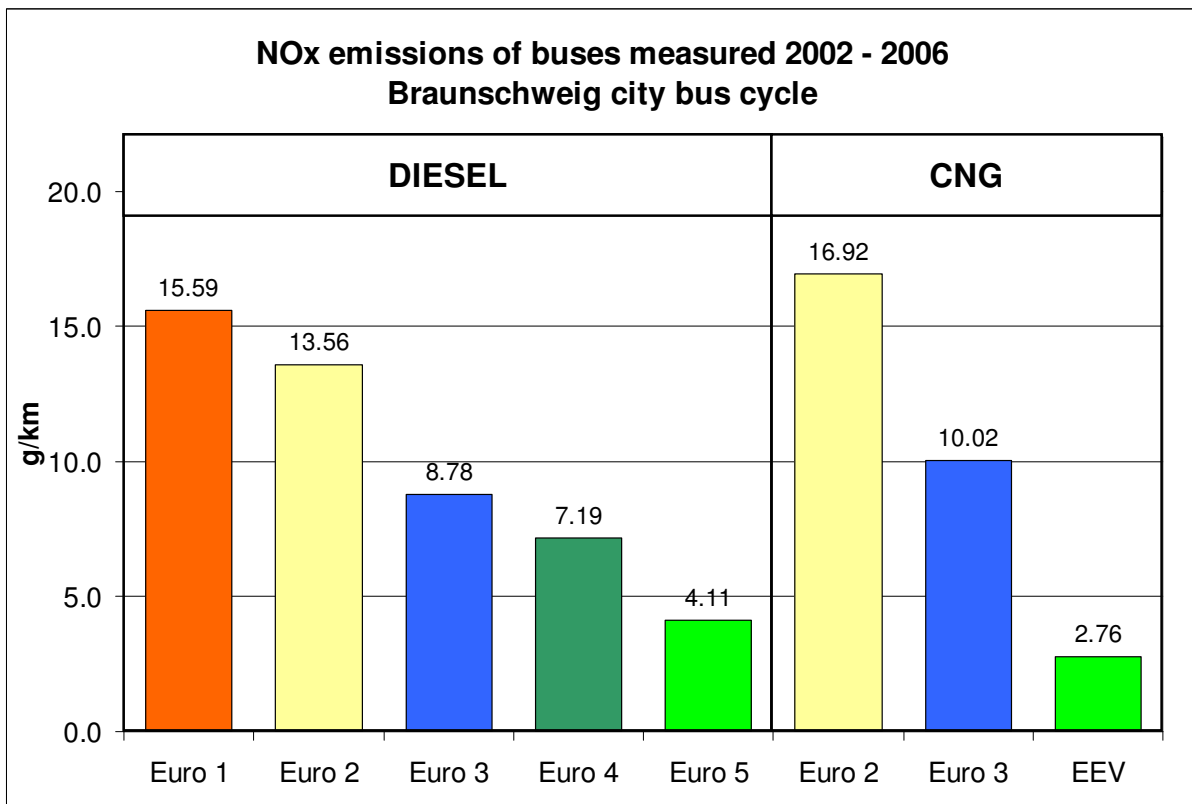
Dieselautojen osalta Euro 2-päästörajoista tiukempiin Euro 3 -rajoihin siirtyminen pakotti valmistajat siirtymään kehittyneempiin sähköisesti ohjattuihin ruiskutusjärjestelmiin. Aikaisempaa tarkempien ruiskutusjärjestelmien avulla moottorit saatiin aikaisempaa puhtaammiksi. Kehitys palamistapahtumassa ei kuitenkaan ollut aivan yhtä merkittävä kuin muutokset päästörajoissa, mistä syystä moottorien säätöjen osalta jouduttiin tekemään aikaisempaa suurempi kompromissi NO_x-päästöjen ja polttoainenkulutuksen välillä. Kehittyneempien ruiskutusjärjestelmien hyöty ulosmitattiin näin matalampina NO_x-päästöinä, partikkelipäästöjen pysyessä lähes samalla tasolla (kuvat 16 ja 17).

Myös Euro 3 –aikakauden sisällä nähtiin selvää kehitystä päästöissä. Kuvassa 15 on esitetty merkin C vuosimallien 2000 – 2005 Euro 3 autojen NO_x- ja PM-päästöt eri mittauskerroilla. Vuoden 2002 auto on VTT:llä seurannassa ollut yksilö. (kts. kappale 4.2).



Kuva 15. Merkin C Euro 3 autojen päästöjen kehittyminen vuosimallien myötä.

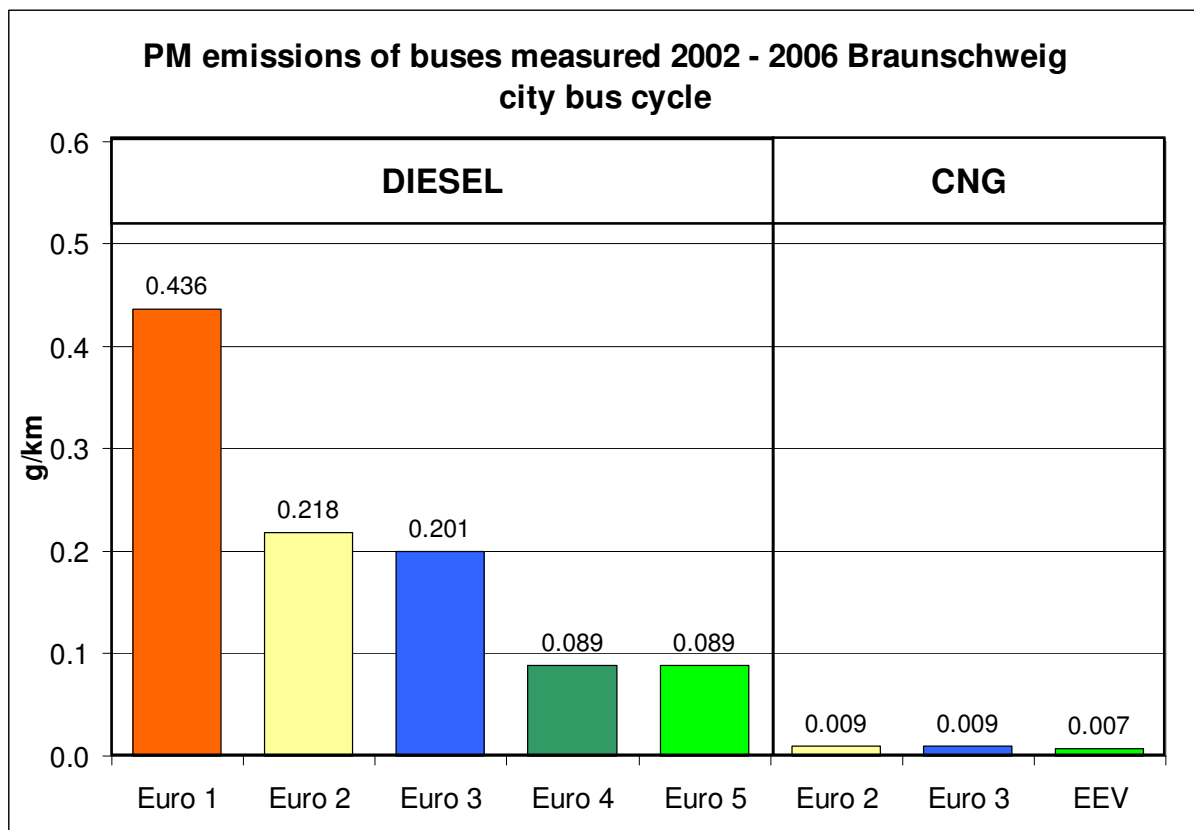
NO_x-päästökertoimissa näkyy selkeä päästölukituksen suuntaisesti laskeva trendi (kuva 16). Verraten uusimpiin ja puhtaimpiin Euro 3 autoihin, mittauksissa käyneiden Euro 4 autojen NO_x-tulokset olivat keskimäärin samalla tasolla. Verraten koko Euro 3 kalustoon, ottaen huomioon myös vanhemmat yksilöt, eroa kuitenkin syntyy.



Kuva 16. NO_x-päästökertoimet (g/km) eri autoluokille (2-akseliset)

Partikkelipäästökertoimissa huomattavaa on mm. se, ettei Euro 2 ja Euro 3 autojen välillä ole kovinkaan suurta eroa (kuva 17). Euro 2 -päästörajat olivat vielä sen verran helposti saavutettavissa ilman jälkikäsitteilytekniikoita, että moottorit voitiin säätää polttoaineenkulutuksen suhteen melko edulliseksi. Moottorit siis säädettiin tuottamaan suhteessa enemmän NO_x-päästöjä kuin partikkeleita, mikä vaikuttaa polttoaineenkulutusta alentavasti.

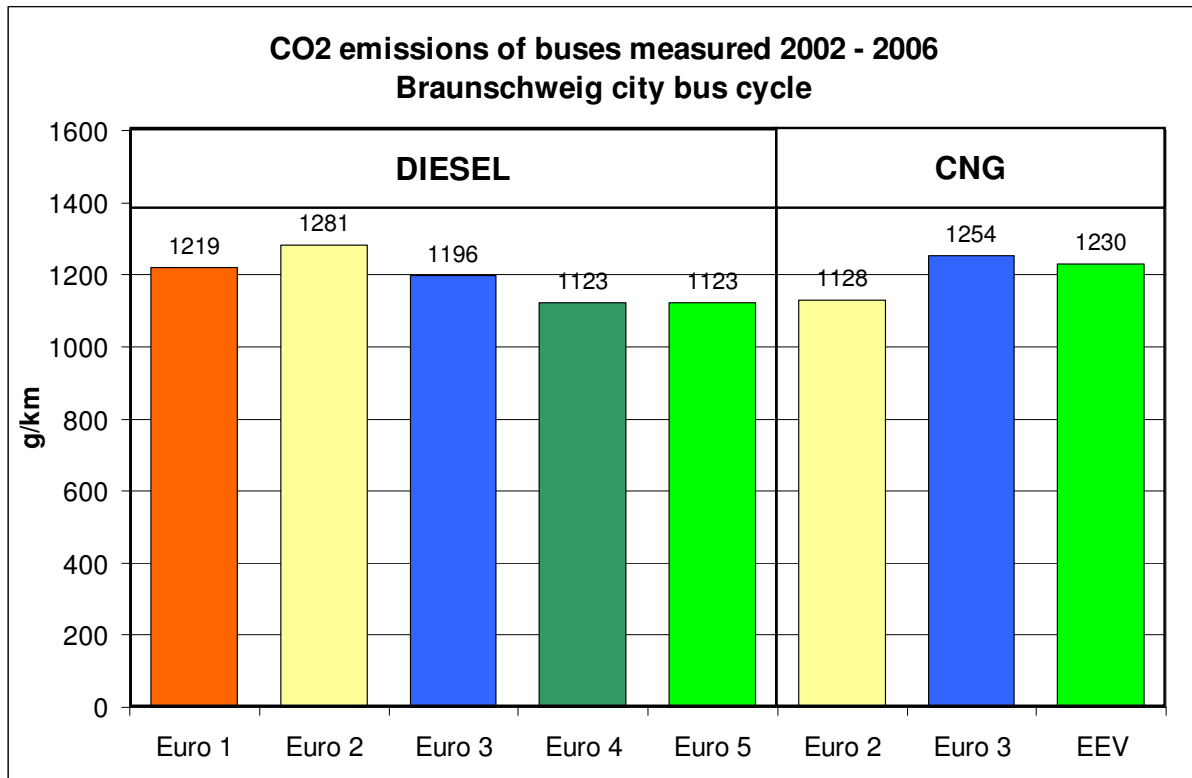
Euro 4 ja 5 autojen partikkelipäästöt ovat keskimäärin alle puolet siitä mitä Euro 3 autojen päästöt. Maakaasuautojen partikkelipäästöt puolestaan ovat autotyypistä riippumatta erittäin matalat. (kuva 17)



Kuva 17. PM-päästökertoimet (g/km) eri autoluokille (2-akseliset)

CO₂ päästökertoimiin vaikuttavat päästörajoituksia enemmän automallien ja käytettyjen tekniikoiden väliset erot. Pienimmät CO₂ -päästöt ovat kaikissa diesel Euro 1 - 5 -luokissa tasolla n. 1100 g/km, mutta vanhempien autotyyppien osalta hajonta on huomattavasti suurempaa. Uusimpien Euro 4 autojen CO₂ päästöt puolestaan olivat kaikki tiukassa haarukassa 1060 – 1190 g/km, mistä syystä keskiarvokin on vanhempia autoja matalampi. (kuva 18)

Kaasuautojen CO₂-päästöt ovat käytännössä samalla tasolla dieselautojen kanssa. Taso n. 1100 g/km saavutetaan sekä vanhemmilla laihaseostekniikkaan pohjautuvilla kaasuautoilla että uudemmilla stoikiometrisilla moottoreilla varustetuilla autoilla. Euro 3 ja EEV maakaasuautojen CO₂-keskiarvoa nostavat laihaseosteiset Euro 3 ja EEV autot, joiden moottorien säädöissä on jouduttu tekemään uhrauksia polttoaineenkulutuksessa tiukempien NO_x-päästörajojen täyttämiseksi.

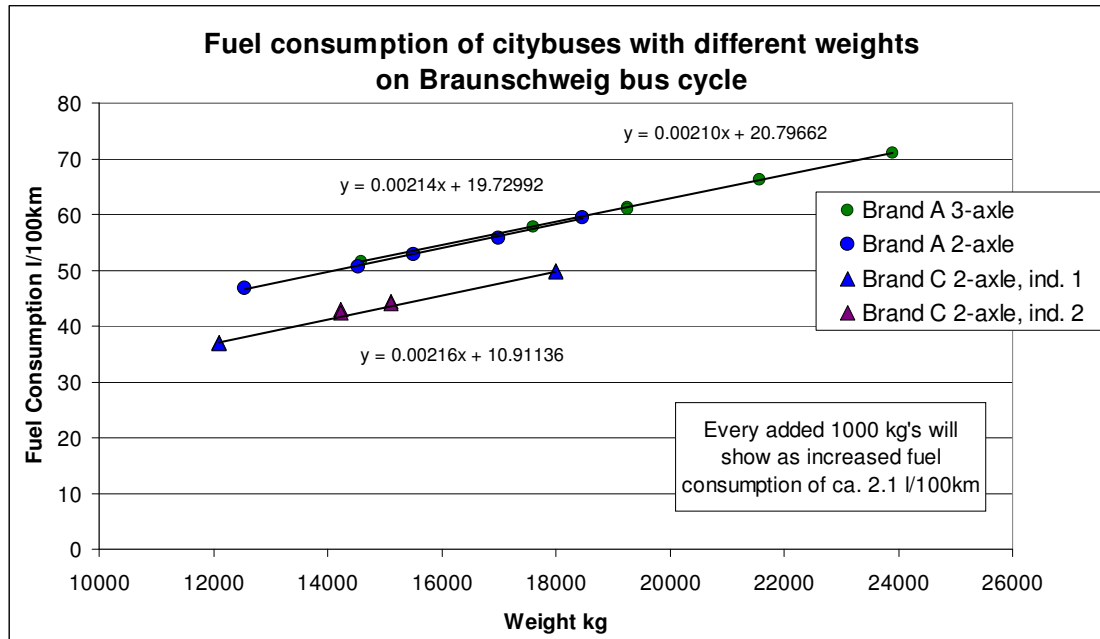


Kuva 18. CO₂-päästökertoimet (g/km) eri autoluokille (2-akseliset)

4.4.2 3-akselisten autojen päästöjen arviointi

Autojen painolla on selvä vaikutus sekä polttoaineenkulutukseen että päästöihin. Etenkin kaupunkibussien polttoaineenkulutuksen riippuvuus painosta on suoraviivainen. Kuvassa 19 on esitetty kolmen Euro 3 -kaupunkibussin polttoaineenkulutukset suhteessa massaansa. Merkin A molemmat tulokset (2-akselinen ja 3-akselinen) on mitattu samalla autoyksilöllä, mutta käyttäen dynamometrin asetusarvoina joko 2-akselisen tai 3-akselisen auton ajovastuksia ja inertiaa. Merkin C tuloksia on edustamassa kahden eri yksilön mittaustulokset (siniset ja violetit kolmiot). Yhteistä tuloksille on se, että kaikissa tapauksissa polttoaineenkulutus kasvaa noin 2.1 l/100km jokaista tuhatta kiloa kohden (kuva 19). Suhdetta voi pitää ohjeellisena, mutta siihen on suhtauduttava varauksella, etenkin uudempien ja monimutkaisempien Euro 4/5/EEV autojen osalta, jotka saattava reagoida kuormitukseen eri tavoin mm. takaisinkytkettyjen pakokaasujen jälkikäsitelyjärjestelmien vuoksi. Tarkkuus kuitenkin riittää mainiosti useimpiin yleisen tason päästöjen arviointeihin.

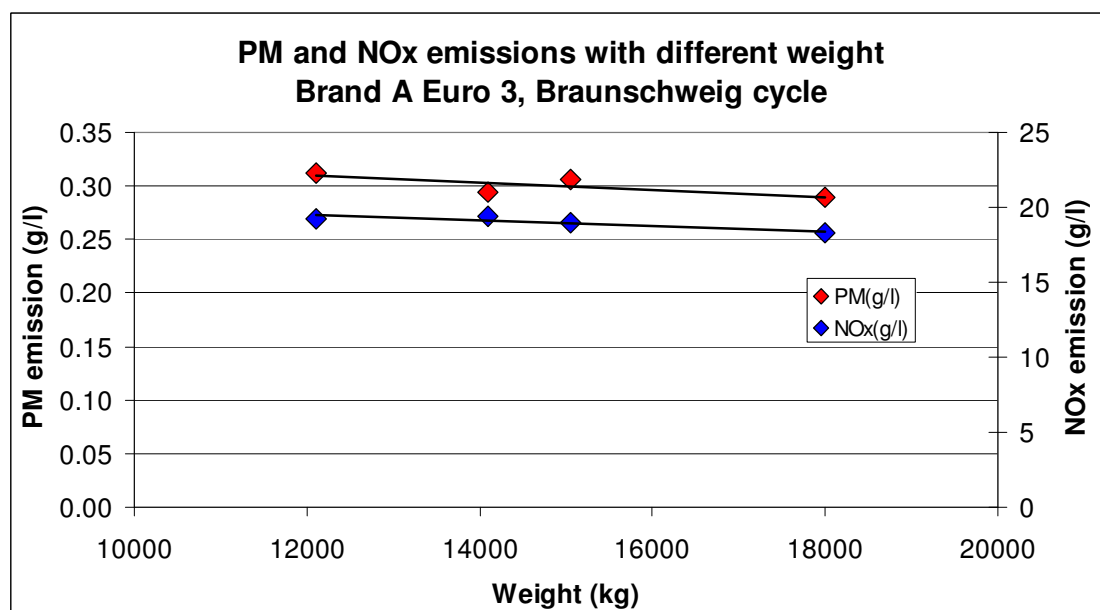
Mikäli yksilöllisempää autotyyppikohtaista tietoa ei ole käytettävissä, voidaan sekä kaksi- että kolmeakselisten autojen kulutusta arvioida suoraan massan suhteen.



Kuva 19. Kaupunkibussien polttoaineenkulutuksen suoraviivainen riippuvuus painosta.

Perusdieseleillä myös NO_x- ja partikkelipäästöt reagoivat kulutuksen tapaan suhteellisen suoraviivaisesti kuorman ja polttoaineen kulutuksen kasvuun. Näin ollen päästöt suhteessa kulutukseen ovat jokseenkin vakiot. Kuvassa 20 on esitetty Euro 3 auton NO_x- ja PM-päästöt muodossa g/l. Esitystapa g/l ottaa huomioon sekä auton kuormituksen että ajosyklin vaikutusta.

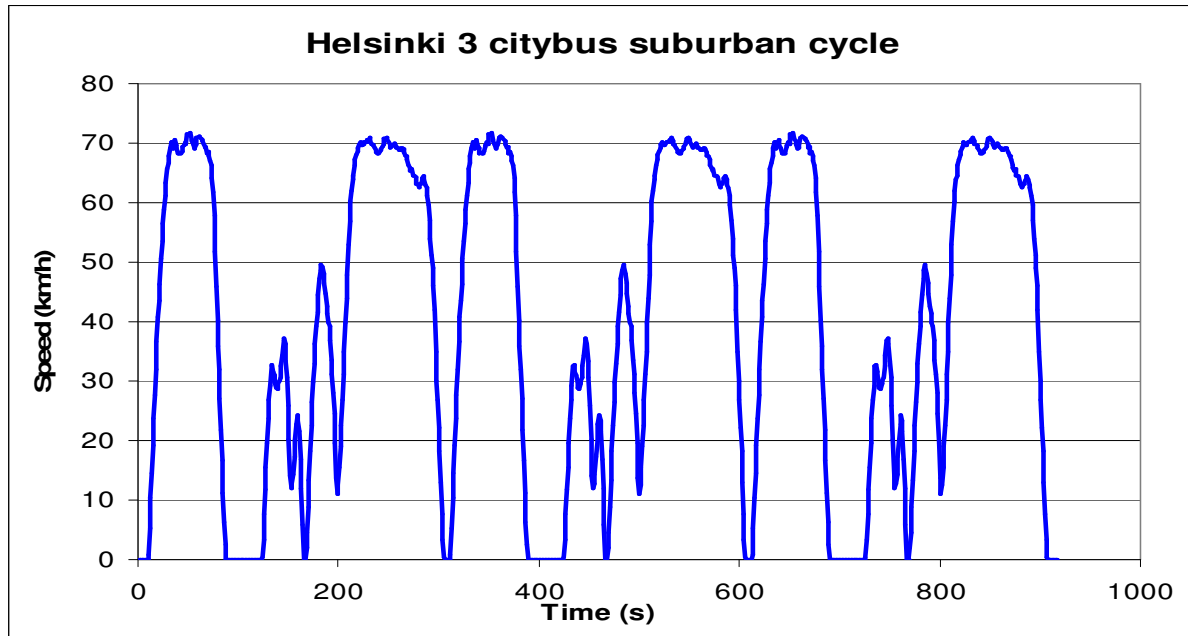
Perustuen edellä mainittuihin havaintoihin, voidaan tässä raportissa esitettyjä 2-akselisten kaupunkibussien tuloksia varauksin käyttää myös 3-akselisille versioille, ottamalla painoero huomioon vertailtavien autojen painojen suhteella. Perinteinen 2-akselisen kaupunkibussi painaa puolessa kuormassa keskimäärin n. 15 000 kg ja vastaava 3-akselinen n. 19 000, joista laskemalla 3-akselisten autojen muuntokertoimeksi saadaan 1.27.



Kuva 20. Euro 3 kaupunkibussin PM- ja NO_x- päästöt polttoaineenkulutuksen suhteen eri kuormilla ajettaessa

4.4.3 Päästöt pääväylillä ja kehäteillä

Kuvassa 21 on esitetty VTT:n määrittelemä Helsingin alueen pääväylien ja kehäteiden liikennettä kuvaavan ajosyklin ”Helsinki 3”:n nopeus-aika -kuvaaja. Tarkempaa tietoa ajosyklistä ja sen kehityksestä on löydettävissä HDenergia-projektin vuosiraportista 2004. <http://www.rastu.fi/>



Kuva 21. Helsinki 3 ajosyklin nopeusprofiili ajan suhteen. Ajosykli kuvaa Helsingin seudun pääväylien ja kehäteiden bussiliikennettä.

Helsinki 3 syklin ajoprofiili ja moottorin kuormitus poikkeaa Braunschweig-syklistä oleellisesti. Helsinki 3:ssa ajonopeudet ovat korkeampia ja pysähdyksiä on matkan suhteen vähemmän. Ajosyklin erilaisuudesta johtuen myös päästötulokset luonnollisesti poikkeavat Braunschweig syklin tuloksista. Taulukossa 3 on esitetty merkin C Euro 3 autolla määritetyt päästökomponenttien suhteet Helsinki 3 syklissä verraten Braunschweig sykliin.

Taulukko 3. Merkin C Euro 3 –kaupunkibussin Helsinki 3 tulosten suhteet Braunschweig-tuloksiin

CO	HC	CH4	NOX	PM	CO2
0.61	0.77	0.77	0.75	0.90	0.81

Taulukkoon 3 kerätyt erilliset päästökomponenttien kertoimet ovat riippuvaisia autotyypistä ja moottoritekniikasta, joten vähintään yhtä vahvoon perusteisiin kaikkien komponenttien kertoimena voidaan pitää myös CO₂ (polttoainekulutuksen) avulla määritettyä kerrointa 0.81, ts. kertoa kaikki Braunschweig-syklien tulokset kiinteällä 0.81 kertoimella väylä- ja kehäteiden päästöjen arvioimiseksi. Virhettä tässä karkeassa yleistyksessä toki tulee. Kiinteällä kertoimella arvioidut kaupunkibussien väyläliikenteen päästökertoimet on kerätty taulukkoon 4.

Taulukko 4. Väylien ja kehäteiden liikenteen päästökertoimet (arvot skaalattu Braunschweig-syklin tuloksista kiinteällä kertoimella 0.81. Tuloksia voidaan pitää vain yleistävinä arvioina)

Helsinki3	<i>CO</i> g/km	<i>HC</i> g/km	<i>CH4*</i> g/km	<i>NOx</i> g/km	<i>PM</i> g/km	<i>CO2</i> g/km	<i>CO2 ekv**</i> g/km	<i>Kulutus</i> kg/100km	<i>Kulutus</i> MJ/km
Diesel Euro 1	1.12	0.26	0.00	12.63	0.353	988	988	31.1	13.2
Diesel Euro 2	1.26	0.16	0.00	10.98	0.177	1038	1038	32.9	14.0
Diesel Euro 3	0.61	0.10	0.00	7.09	0.161	965	965	30.7	13.0
Diesel Euro 4	3.07	0.03	0.00	5.82	0.072	910	910	29.4	12.5
<i>Diesel Euro 5***</i>	<i>3.07</i>	<i>0.03</i>	<i>0.00</i>	<i>3.33</i>	<i>0.072</i>	<i>910</i>	<i>910</i>	<i>29.4</i>	<i>12.5</i>
CNG Euro 2	3.50	5.76	5.09	13.70	0.007	914	1039	33.9	16.2
CNG Euro 3	0.15	1.08	0.73	8.12	0.008	1016	1040	36.9	17.6
CNG EEV	1.24	0.78	0.61	2.23	0.006	996	1012	36.8	17.6

*Maakaasuautoille käytetty CH4 = THC * 0.95, dieselille CH4 = 0
 ** CO2 ekv = CO2 + 23 * CH4
 *** Euro 5 tulokset arvioitu Euro 4 tulosten perusteella

5 Yhteenveto

Päästörajojen kiristymisen pitäisi vähentää päästöjä myös käytännön ajotilanteissa. Molemmissa säänneltyjen päästöjen ongelmakomponenteissa, typen oksidi- (NO_x) ja partikkelipäästöissä nähdään selvä laskeva trendi Euro-päästö luokitusten suuntaisesti, mutta hajonta eri automallien välillä voi olla merkittävää.

Uusimpien Euro 4 ja Euro 5 -automallien osalta nähdään sekä suhteellisen hyviä tuloksia että Euro 3 tekniikan kanssa yhteneviä päästömääriä. Mallista ja mahdollisesti myös yksilöstä riippuen tulokset hajoavat kaikkien päästökomenttien osalta merkittävästi. Huonoimmat tulokset ovat jopa moninkertaisia samaan päästöluokkaan tyypitettyihin puhtaampiin autoihin verrattuna.

Autojen ikääntyminen näkyy selvimmin häkä- (CO) ja hiilivety- (HC) -päästöissä. Seurantamittauksissa käyneiden Euro 2 ja Euro 3 dieselautojen CO- ja HC-päästöt ovat havaittavasti kohonneet 300tkm tietämillä. Euro 3 auton tulokset yli 500tkm:n ajomäärällä ovat jo samalla tasolla ilman katalysaattoria ajettujen mittausten kanssa.

Korvaamalla vanha katalysaattori uudella, voidaan CO- ja THC-päästöt palauttaa alkuperäiselle tasolle. Toinen vielä tehokkaampi vaihtoehto, hapettava partikkelikatalysaattori (PDPF), puolestaan vähentää CO- ja THC-päästöjen lisäksi merkittävästi myös partikkelipäästöjä, jopa n.50%. PDPF:n ei CO₂-päästöjen perusteella havaittu vaikuttavan kulutukseen (vertailukohtana alkuperäinen hapettava katalysaattori).

Uusien autojen mittausten myötä nyt voitiin päivittää päästökertoimet kattamaan myös Euro 4 dieselit. Euro 4 -autojen perusteella voidaan myös arvioida samaan tekniikkaan perustuvien Euro 5 -autojen päästökertoimia.

Kaksiakselisten kaupunkibussien keskusta-ajon päästökertoimia voidaan myös soveltaa varauksin kolmiakselisille autoille ja jopa väylätyyppiseen ajoon. Jatkossa tulee harkita myös väylätyyppisen ajon suoria mittauksia, jolloin eri tekniikoiden reagointi kuormitukseen saadaan paremmin huomioitua päästökertoimissa.

Maakaasuautot ovat partikkelien osalta erittäin puhtaita, kun taas NO_x-päästöt ovat sidoksissa päästöluokkiin ja käytettyyn tekniikkaan. Uusimmista EEV-autoista puhtaimpia tuloksia antoivat stoikiometrisella seoksella ja kolmitoimikatalysaattorilla varustetut autot.

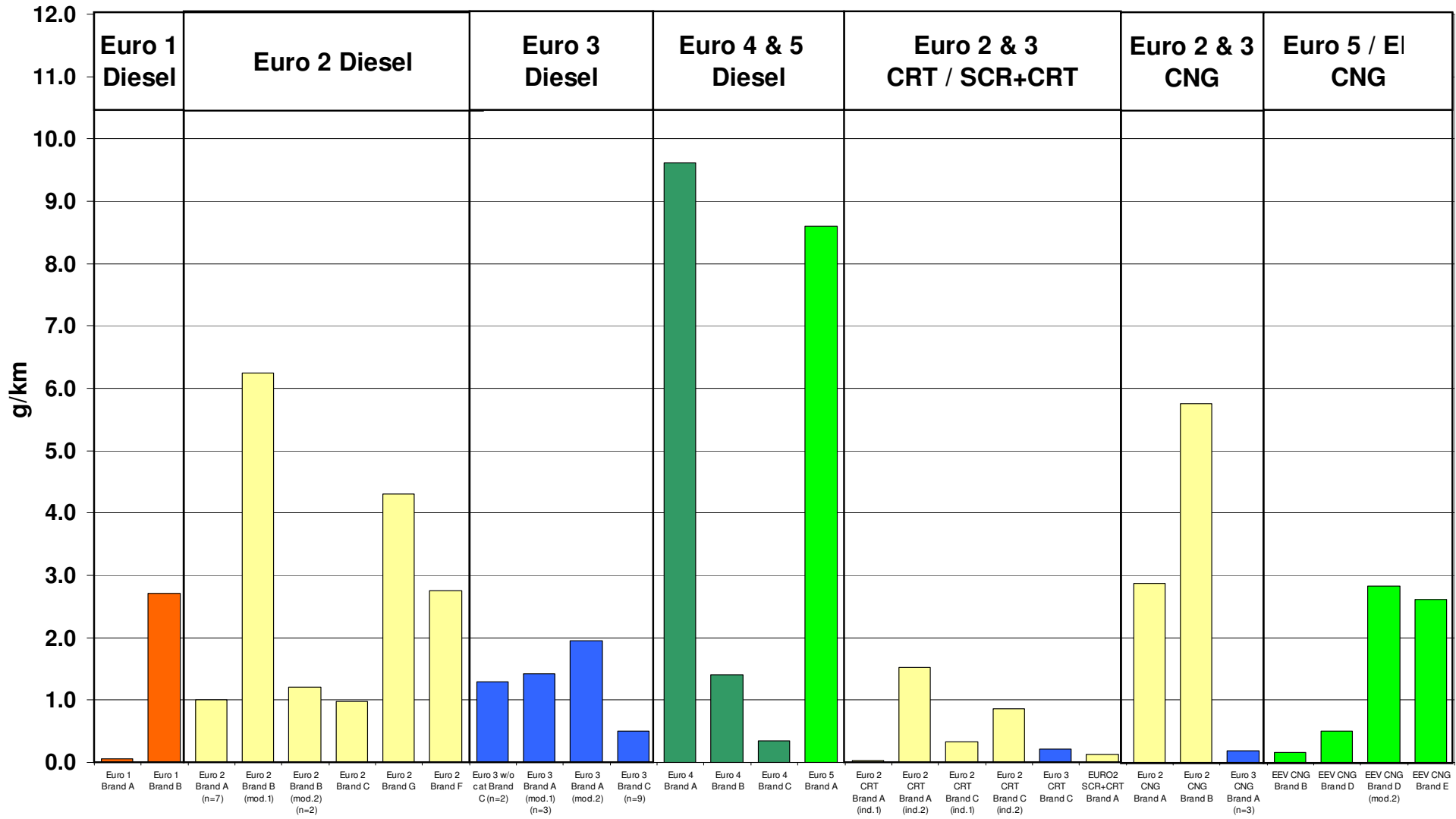
Lähdeviitteet

- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Third Assessment Report. Climate Change 2001: The Scientific Basis.
http://www.grida.no/climate/ipcc_tar/
- Nylund, Nils-Olof, Erkkilä, Kimmo & Hartikka, Tuukka. Kaupunkibussien polttoaineenkulutus ja pakokaasupäästöt. Uusimman dieseltekniikan suorituskyky. Espoo 2007. VTT Tiedotteita 2372. 47 s. + liitt. 1 s.
<http://virtual.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2007/T2372.pdf>
- Nylund, Nils-Olof, Erkkilä, Kimmo, Lappi, Maija & Ikonen, Markku. (2004). Transient Bus Emission Study: Comparison of Emissions from Diesel and natural Gas Buses. Research Report PRO3/P5150/04. VTT Processes, Espoo, October 2004.
<http://www.vtt.fi/inf/pdf/jurelinkit/VTTNylund.pdf>
- Nylund, Nils-Olof & Erkkilä, Kimmo. (2005). Bussikaluston pakokaasupäästöjen evaluointi. Yhteenvetoraportti 2002 -2004. Tutkimusselostus PRO3/P3018/05. VTT Prosessit, Espoo, huhtikuu 2005.
<http://virtual.vtt.fi/inf/julkaisut/muut/2005/RAKEBUS.pdf>
- Nylund, N.-O. toim. (2006). Raskaan ajoneuvokaluston energiankäytön tehostaminen. Yhteenvetoraportti 2003 - 2005. Projektiraportti VTT-R-03125-06. VTT, Espoo, maaliskuu 2006.
http://www.motiva.fi/attachment/f16d4d543f99d7a59f54560a69063a0e/a24f4291c273a747dcd0bc71c80a007c/HDenergia_yhteenvetoraportti_lopullinen_viim.pdf
- Nils-Olof Nylund, Kimmo Erkkilä & Mårten Westerholm. Raskaan ajoneuvokaluston energiankäytön tehostaminen. Raportti 2004. VTT, Espoo 28.2.2005. Projektiraportti PRO3/P3006/05. 45 s.

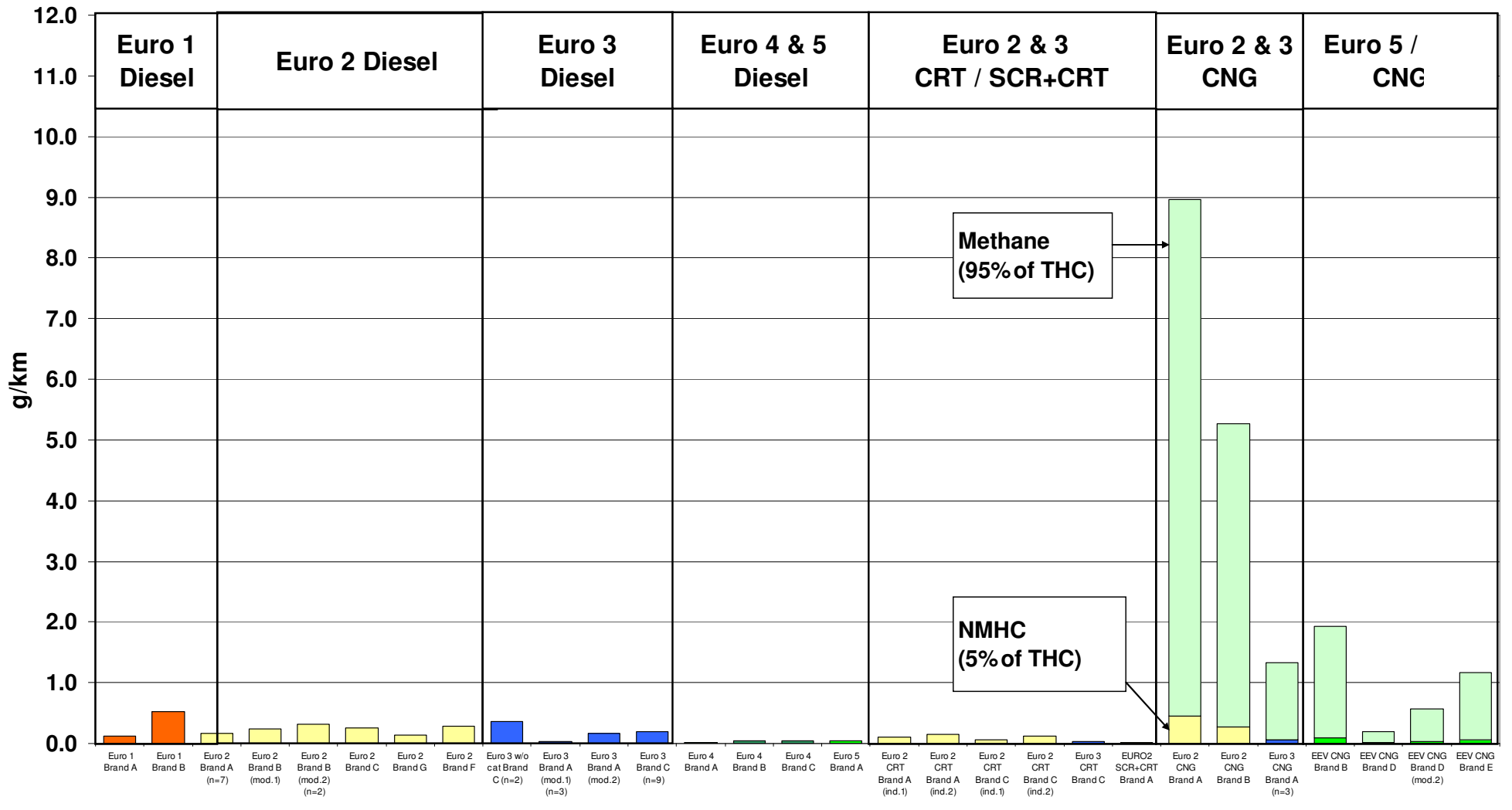
Braunschweig	CO g/km	HC g/km	CH4* g/km	NOX g/km	PM g/km	CO2 g/km	CO2 ekv** g/km	Kulutus kg/100km	Kulutus MJ/km
Euro 1 Brand A	0.06	0.12	0.00	19.5	0.248	1355	1355	42.8	18.2
Euro 1 Brand B	2.71	0.52	0.00	11.7	0.624	1084	1084	34.4	14.6
Euro 2 Brand A (n=7)	1.01	0.14	0.00	13.2	0.152	1330	1330	42.7	18.1
Euro 2 Brand B (mod.1)	6.24	0.23	0.00	16.6	0.235	1557	1557	49.5	21.0
Euro 2 Brand B (mod.2) (n=2)	1.20	0.32	0.00	12.3	0.276	1200	1200	38.0	16.1
Euro 2 Brand C	0.98	0.24	0.00	8.8	0.176	1268	1268	40.1	17.0
Euro 2 Brand G	4.31	0.15	0.00	16.5	0.398	1364	1364	43.3	18.4
Euro 2 Brand F	2.76	0.29	0.00	19.7	0.297	1131	1131	35.9	15.2
Euro 3 w/o cat Brand C (n=2)	1.29	0.36	0.00	8.5	0.156	1216	1216	38.5	16.4
Euro 3 Brand A (mod.1) (n=3)	1.42	0.03	0.00	8.9	0.353	1229	1229	39.2	16.7
Euro 3 Brand A (mod.2)	1.96	0.18	0.00	11.7	0.257	1426	1426	45.1	19.2
Euro 3 Brand C (n=9)	0.50	0.17	0.00	8.7	0.139	1183	1183	37.7	16.0
Euro 4 Brand A	9.62	0.01	0.00	9.2	0.114	1109	1109	35.7	15.2
Euro 4 Brand B	1.41	0.04	0.00	2.6	0.058	1064	1064	35.8	15.2
Euro 4 Brand C	0.35	0.04	0.00	9.8	0.095	1196	1196	38.0	16.1
Euro 5 Brand A	8.60	0.04	0.00	2.5	0.109	1384	1384	46.2	19.7
Euro 2 CRT Brand A (ind.1)	0.04	0.10	0.00	11.7	0.407	1592	1592	50.3	21.4
Euro 2 CRT Brand A (ind.2)	1.52	0.14	0.00	11.9	0.054	1353	1353	42.8	18.2
Euro 2 CRT Brand C (ind.1)	0.33	0.01	0.00	10.3	0.014	1453	1453	45.9	19.5
Euro 2 CRT Brand C (ind.2)	0.86	0.13	0.00	8.5	0.204	1424	1424	45.0	19.1
Euro 3 CRT Brand C	0.22	0.03	0.00	8.6	0.019	1239	1239	39.1	16.6
EURO 2 SCR+CRT Brand A	0.12	0.01	0.00	1.5	0.010	1176	1176	41.6	17.7
Euro 2 CNG Brand A	2.87	8.96	8.51	17.6	0.007	1157	1345	43.2	20.6
Euro 2 CNG Brand B	5.76	5.27	5.01	16.3	0.011	1100	1221	40.9	19.5
Euro 3 CNG Brand A (n=3)	0.18	1.33	1.26	10.0	0.009	1254	1284	45.8	21.9
EEV CNG Brand B	0.16	1.93	1.83	4.5	0.016	1450	1495	53.0	25.3
EEV CNG Brand D	0.50	0.19	0.19	2.2	0.003	1300	1304	47.4	22.6
EEV CNG Brand D (mod.2)	2.83	0.57	0.54	2.1	0.001	1125	1125	44.1	21.0
EEV CNG Brand E	2.62	1.17	1.11	2.2	0.008	1044	1071	38.3	18.3

(n=x) = otosten lukumäärä, (mod.x) = mallin tunniste, (ind.x) = yksilöin tunniste
 *Maakaasuautoille käytetty CH4 = THC * 0.95, dieseleille CH4 = 0
 ** CO2 ekv = CO2 + 23 * CH4

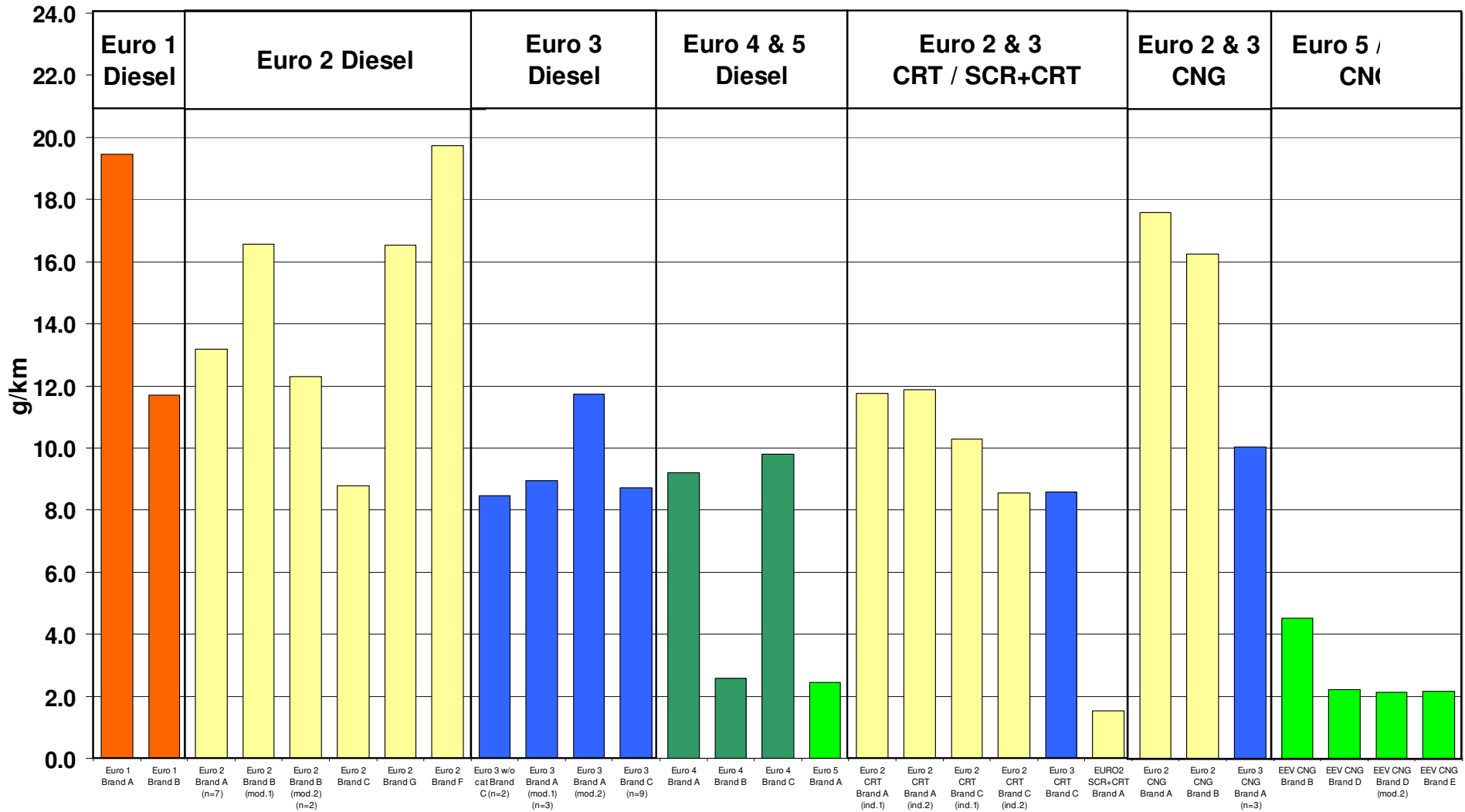
CO emissions of buses measured 2002 - 2006, Braunschweig city bus cycle



THC emissions of buses measured 2002 - 2006, Braunschweig city bus cycle



NOx emissions of buses measured 2002 - 2006, Braunschweig city bus cycle



CO2 emissions of buses measured 2002 - 2006, Braunschweig city bus cycle

