



RASKAS AJONEUVOKALUSTO: TURVALLISUUS, YMPÄRISTÖOMINAI- SUUDET JA UUSI TEKNIikka "RASTU"

Yhteenvetoraportti 2006-2008

Toimittajat Matti Kytö, Kimmo Erkkilä & Nils-Olof Nylund

Julkisuus: Julkinen

Suorittajaorganisaatio ja osoite VTT PL 1604 02044 VTT Projektin vastuhenkilö Matti Kytö Projektin asiakirjanumero (VTT)	Tilaaja Tekes ym. Tilaajan yhdyshenkilö Martti Korkiakoski Tilaajan tilaus- tai viitenumero 40521/05, Dnro 2699/31/05	
Hankkeen nimi, lyhytnimi ja suoritettunus Raskas ajoneuvokalusto: Turvallisuus, ympäristö- ominaisuudet ja uusi tekniikka, RASTU 3155	Raportin numero ja sivumäärä VTT-R-04084-09 114 s. + liite 1 s.	Päiväys 2.6.2009

Projektiraportin nimi ja kirjoittajat Raskas ajoneuvokalusto: Turvallisuus, ympäristöominaisuudet ja uusi tekniikka ”RASTU”. Yhteenvetoraportti. Toimittanut Matti Kytö, Kimmo Erkkilä & Nils-Olof Nylund
--

Tiivistelmä Raskaiden ajoneuvojen polttoaineen säästöön tähtäävä tutkimustyö toteutettiin kolmivuotisen (2006 – 2008) ”RASTU”-hankkeen puitteissa. Kokonaisuuteen sisältyi myös päästöihin, IT-sovelluksiin ja turvallisuuteen liittyviä tehtäviä. Hankkeessa oli mukana viisi tutkijaosapuolta ja lähes 20 eri rahoittajaa. Jakson aikana alustadynamometrissa mitattiin yhteensä noin 140 raskasta ajoneuvoa. Yleisenä trendinä nähdään, että uusien autojen (Euro IV, V ja EEV) päästöt ovat laskusuunnassa, samaten polttoaineen kulutus. Merkkikohtaiset erot ovat kuitenkin huomattavat. Päästöissä on varsinkin bussien osalta suurta hajontaa, ja vain harva dieselauto vastaa todellisilta päästöiltään sertifiointiluokkaansa. Kuorma-autoissa autojen todelliset päästötasot vastaavat keskimäärin ilmoitettua päästölukkaa. Euro IV päästömääräykset toivat markkinoille sekä EGR että SCR tekniikkaan perustuvia ratkaisuja. Tutkimusjakson alussa SCR autot antoivat keskimäärin sekä alhaisemmat pakokaasupäästö- että kulutusarvot. Jakson lopulla tilanne on hieman tasaantunut varsinkin kuorma-aitojen osalta. Oikealla auton valinnalla voidaan kuitenkin saavuttaa 5 – 10 %:n polttoaineen säästö. Pakokaasumittauksissa tutkittiin myös uusien vähäpäästöisten ajoneuvojen lainsäädännön sääntelyn piiriin kuulumattomia päästöjä, kuten aldehydejä, ammoniakkaa, yksittäisiä kaasumaisia hiilivejä, NO ₂ -pitoisuutta, hiukkasten PAH-yhdisteitä ja mutageenisuutta, sekä hiukkasten lukumäärää ja kokojakaamaa. Yleisesti EEV-tason dieselajoneuvot olivat Euro III ja Euro IV-ajoneuvoja ”puhtaampia” muiden kuin NO ₂ -päästön suhteen. Kaasubussit tarjoavat edelleen päästöetuja uusimpiinkin dieselbusseihin verrattuna. Ajoneuvotekniikan kehitystyöhön kohdistuvia osatehtävistä moni toteutettiin diplomityönä. Kehityskohteita haettiin aerodynamiikasta, renkaista, raskaiden ajoneuvojen massan pienentämisestä kevytrakennetekniikalla, akseliston suuntaamisesta, moduuliyhdistelmän stabiliteetista sekä 42- ja 60-tonnisten yhdistelmien energiatehokkuusvertailulla. Varsinaisia perävaunuyhdistelmiä varten kehitettiin turvallisuuden varmistava mutta polttoaineen kulutuksen minimoiva rengastussuositus. Projektissa kehitettiin ajoneuvon IT -sovelluksina kuljettajan ajo-opastinta, automaattista liukkauden sekä kuorman tunnistusta. Ajo-opastimessa keskityttiin kaupunkibussin opastamiseen. Prototyypistielle kehitetty opastin asennettiin yhteensä 15 linja-autoon pääkaupunkiseudulla ja Jyväskylässä. Kuljettajien taloudellisen ajotavan kannustinjärjestelmä, jolla voidaan parantaa ja pitkittää taloudellisen ajotavan koulutusten vaikutuksia, demonstroitiin projektissa. Energiansäästötoimenpiteiden tehokkuuden arviointi osatehtävässä kehitettiin energiansäästötoimenpiteiden tehokkuuden arviointilaskelmia.
--

Jakelu: RASTU -johtoryhmä Päivitykset:	Julkisuus Julkinen Päivämäärä:
--	--

Projektin vastuhenkilö Matti Kytö	Tarkastus- ja hyväksymisallekirjoitukset Jukka Lehtomäki
---	--

SISÄLLYSLUETTELO

LYHENTEET	2
ESIPUHE	3
1 “RASTU” –TUTKIMUSKOKONAISUUDEN YLEISESITTELY	4
2 EURO IV/V/EEV –AUTOJEN SUORITUSKYKY	6
2.1 KAUPUNKIBUSSIEN MITTAUKSET	6
2.1.1 Yleistä	6
2.1.2 Typen oksidit ja partikkelit.....	9
2.1.3 Hiilidioksidipäästöt ja energiatehokkuus.....	10
2.1.4 Seuranta-autot.....	12
2.1.5 Yhteenveto.....	14
2.2 KUORMA-AUTOJEN MITTAUKSET	15
2.2.1 Yleistä	15
2.2.2 42–tonnisten autojen vertailumittaukset	16
2.2.3 18–tonnisten jakeluautojen vertailumittaukset.....	19
2.2.4 26–tonnisten autojen vertailumittaukset	22
2.2.5 Seurantamittaukset	23
2.2.6 Yhteenveto.....	27
3 EURO IV/V/EEV –AUTOJEN POLTTO- JA VOITELU-AINEET	28
3.1 YLEISTÄ	28
3.2 POLTTOAINEKOKEET	28
3.2.1 Kevyen jakelukaluston kokeet.....	28
3.2.2 Raskas jakelukalusto.....	29
3.2.3 Kokeet linja-autoilla (NExBTL) ja kuorma-autoilla (MK1).....	30
3.3 VOITELUAINEKOKEET.....	30
3.4 LIIKENTEEN POLTTOAINEVAIHTOEHDOT –KEHITYS-TILANNERAPORTTI.....	35
4 AJONEUVOTEKNINEN KEHITYSTYÖ	35
4.1 YLEISTÄ	35
4.2 KEVYTRAKENNETEKNIikka (TKK)	36
4.3 MODUULIYHDISTELMIEN STABILITEETTI JA RENKAIDEN VAIKUTUS (TKK)	36
4.4 42/60-TONNISTEN AJONEUVOYHDISTELMIEN ENERGIA-TEHOKKUUSVERTAILU (VTT)	37
4.4.1 Ajoneuvojen valinta	38
4.4.2 Mittausten toteutus	39
4.4.3 Alustadynamometrimittaukset	41
4.4.4 Vertailu HDEnergia-projektin tuloksiin.....	44
4.5 RENGASMITTAUKSET (VTT).....	45
4.6 AERODYNAMIIKKA	45
4.6.1 Yleistä	45
4.6.2 Kuorma-autot	46
4.6.3 Linja-autot.....	50
4.7 RASKAIDEN AJONEUVOJEN MASSA (TuRKUAMK)	51
4.8 AKSELISTOSUUNTAUS	52
4.8.1 Yleistä	52
4.8.2 Tietokanta	53
4.8.3 Ajovastusmäärittely	53
4.8.4 Akselistopoikkeaman vaikutus.....	54
5 AJONEUVOJEN IT-SOVELLUKSET	56

5.1	YLEISTÄ	56
5.2	LINJA-AUTOJEN AJO-OPASTIN	56
5.2.1	<i>Yleistä</i>	56
5.2.2	<i>Ajo-opastimen kehittäminen</i>	56
5.2.3	<i>Ajo-opastimen toimintaperiaate</i>	57
5.2.4	<i>Opastimen simulointi</i>	57
5.2.5	<i>Opastinjärjestelmän rajapinnat</i>	58
5.2.6	<i>Opastuslogiikka</i>	58
5.2.7	<i>Mittaustulosten analysointi</i>	60
5.2.8	<i>Esimerkkejä kuljettajien suoriutumisesta</i>	67
5.3	LIUKKAUDEN JA KUORMANPAINON AUTOMAATTINEN TUNNISTUS (OY, VTT)	71
5.3.1	<i>Yleistä</i>	71
5.3.2	<i>Liukkaudentunnistus</i>	71
5.3.3	<i>Massan estimointi</i>	72
5.3.4	<i>Järjestelmän komponentit</i>	74
5.4	YHTEENVETO	77
6	LINJA-AUTOJEN LIKKNÖINNIN OPTIMOINTI	77
7	KULJETUSALAN ENERGIATEHOKKUUDEN HALLINTA- JA KANNUSTINJÄRJESTELMÄT	78
7.1	YLEISTÄ	78
7.2	TALOUDELLISEEN AJOTAPAAN KANNUSTAMINEN	79
7.2.1	<i>Kuljettajakohtainen ajotavan seuranta TKL:ssa</i>	80
7.2.2	<i>Seurannan oikeudenmukaisuus ja luotettavuus</i>	81
7.2.3	<i>Kehitystyö Transpoint Oy:ssä</i>	82
7.2.4	<i>Yhteenveto</i>	84
8	ENERGIANSÄÄSTÖTOIMENPITEIDEN TEHOKKUUDEN ARVIOINTI	85
9	MENETELMÄKEHITYS	86
9.1	YLEISTÄ	86
9.2	PEMS MITTAUKSET	86
9.2.1	<i>Mittausjärjestelyt</i>	86
9.2.2	<i>Kalusto</i>	87
9.2.3	<i>Tulokset</i>	87
9.2.4	<i>Johtopäätökset</i>	90
10	PAKOKAASUTUTKIMUS	91
10.1	JOHDANTO	91
10.2	NO/NO ₂ SUHDE JA SEN MERKITYS KAUPUNKI-ILMAAN	91
10.3	LINJA-AUTOJEN SÄÄNTELEMÄTTÖMÄT PÄÄSTÖT	95
10.3.1	<i>Yleistä</i>	95
10.3.2	<i>Hiilivetyypäästöt</i>	96
10.3.3	<i>Karboonyliyhdisteet</i>	98
10.3.4	<i>Ammoniakkipäästö</i>	100
10.3.5	<i>Hiukkasten koko ja lukumäärä</i>	101
10.3.6	<i>PAH-päästöt</i>	104
10.3.7	<i>Hiukkasten mutageenisuus</i>	105
10.4	KUORMA-AUTOJEN EI-SÄÄNNELLYT PÄÄSTÖT	106
10.4.1	<i>Yleistä</i>	106
10.4.2	<i>Hiukkasten koko ja lukumäärä</i>	106
10.4.3	<i>Ammoniakkipäästö</i>	113
10.5	YHTEENVETO	113
11	YHTEENVETO	116

LYHENTEET

EGR. (*Exhaust Gas Recirculation*). Pakokaasujen takaisin kierrätys on typenoksidien vähentämiseen käytetty tekniikka. Johtamalla osa palotuotteesta takaisin sylinteriin saadaan palamislämpötilaa ja ilmaylimäärää sylinterissä pienentyä merkittävästi. EGR:llä on taipumus vähentää palaneen polttoaineen osuutta sylinterissä. Tämä taipumus johtaa kasvaneeseen PM tasoon, joka täytyy korjata muilla keinoilla, kuten suodattimilla.

SCR (*Selective Catalytic Reduction*). Selektiivinen katalysointi on toinen typenoksidien vähentämiseen käytetty tekniikka. Syöttämällä ulkopuolisesta lähteestä katalyyttia (ureaa) pakokaasun sekaan voidaan NOx yhdisteet pelkistää katalyysaattorissa N₂:ksi ja vedeksi. SCR järjestelmän toimintaperiaate mahdollistaa moottorin ruiskutuksen säätämisen polttoaineen ja PM muodostumisen kannalta edulliselle tasolle. Suuren urea ruiskutusmäärät saattavat aiheuttaa reagoimattoman ammoniakkin pääsyn pakokaasun sekaan. Tätä ilmiötä (ammonium slip) voidaan ehkäistä erillisellä katalyysaattorilla. Alhaisella kuormituksella ja kylmässä SCR järjestelmä toimii huonolla hyötysuhteella pakokaasulämpötilojen jäädessä alhaisiksi.

pDPF (*partial Diesel Particulate Filter*). Partikkeli suodatin vähentää partikkelien ja noen osuutta pakokaasussa, tyypillisesti yli 85 %:sti. pDPF on variaatio DPF suodattimesta. pDPF filterin suodatustehokkuus on tyypillisesti välillä 50 – 85 %. pDPF suodattimen aiheuttama vastapaine on kuitenkin DPF suodatinta huomattavasti pienempi. pDPF suodattimet ovat suosittuja jälkiasennuslaitteita. Kaikki DPF suodattimet vaativat aika-ajoin puhdistusta eli regeneraation. Yleensä regeneraatio tapahtuu normaalin käytön aikana.

CRT (*Continuously Regenerating Technology*). Partikkelisuodattimen regenerointi tekniologia, joka perustuu havaintoon jossa PM päästö hapettuu NO₂ läsnä ollessa huomattavasti alemmassa lämpötilassa (250 °C), kuin hapen kanssa (600 °C). CRT suodattimessa ennen hiukkasloukkua on voimakkaasti hapettava yksikkö joka synnyttää NO₂ suodattimen hapettamiseen.

ESIPUHE

VTT toteutti yhteistyössä muiden tutkimusyksiköiden kanssa vuosina 2006 – 2008 raskaiden ajoneuvojen pakokaasupäästöjä ja energian käyttöä koskevan tutkimuskokonaisuuden. Hankekokonaisuus oli jatkoa vuosien 2003 – 2005 polttoaineen säästötutkimukselle, laajentuen uudessa projektissa myös päästöihin, IT-sovelluksiin ja turvallisuuteen liittyviin tehtäviin. Tutkimuksen päärahoittaja oli Tekes – teknologian ja innovaatioiden kehittämiskeskus ja sen ClimBus-teknologiaohjelma. Muita rahoittajia ovat mm. Ajoneuvohallintokeskus (AKE), Liikenne- ja viestintäministeriö (LVM), Helsingin kaupungin liikennelaitos HKL ja Pääkaupunkiseudun yhteistyövaltuuskunta YTV. Lisäksi hanketta rahoitti joukko yrityksiä ja kuljetusliikkeitä.

Seuraavat tutkimusosapuolet osallistuivat hankkeen toteutukseen:

- VTT
- Oulun yliopisto, sähkö- ja tietotekniikan osasto (OY)
- Tampereen Teknillinen Yliopisto, tiedonhallinnan ja logistiikan laitos (TTY)
- Teknillinen Korkeakoulu, autotekniikka (TKK)
- Turun ammattikorkeakoulu (TurkuAMK)
- TEC TransEnergy Consulting Oy, koordinaatio

VTT toimi hankkeen vastuuyksikkönä. Koordinaatiosta vastasi TEC TransEnergy Consulting Oy ja viestinnästä Motiva Oy.

Vuosilta 2006 ja 2007 laadittiin sekä suomenkieliset että suomenkielistä suppeammat englanninkieliset vuosiraportit. Käsillä oleva raportti on vuoden 2008 vuosiraportti sekä koko projektin yhteenvetoraportti, josta tullaan laatimaan myös englanninkielinen versio.

Espoo 2.6.2009

Nils-Olof Nylund
Hankkeen koordinaattori

1 “RASTU” –TUTKIMUSKOKONAISUUDEN YLEISESITTELY

Vuosien 2003 – 2005 tutkimuskokonaisuus HDENERGIA painottui vahvasti raskaan kaluston energian säästöön. RASTU-kokonaisuudessaakin energiansäästöteema oli varsin keskeinen, mutta nyt myös päästöt saivat enemmän painoarvoa. RASTU-hankkeseen yhdistettiin aiemmin erillisinä hankkeina toteutetut bussien ja kuorma-autojen päästömittaushankkeet. Lisäksi toimintakenttää laajennettiin siten, että raskaan kaluston turvallisuustason parantaminen esim. IT–tekniikkaa hyödyntämällä sai hankkeessa tärkeän sijan.

RASTU-hankkeen tavoitteet olivat tiivistetysti:

- Uusiutuvien ajoneuvojen (Euro IV, Euro V, EEV) todellinen suorituskyky
 - energiatehokkuus ja pakokaasupäästöt todellisissa ajotilanteissa
 - raskaiden ajoneuvojen ”ekomerkinntään” tähtäävä kehitystyö
 - uuden ajoneuvotekniikan mahdollisimman tehokas soveltaminen Suomen olosuhteisiin
 - poltto- ja voiteluaineiden optimointi uuteen ajoneuvokalustoon
- IT-tekniikan kehittäminen raskaan kaluston energiankäytön tehostamiseen sekä turvallisuus- ja palvelutason lisäämiseen
- Ajoneuvotekniset ratkaisut polttoaineen kulutuksen vähentämiseksi
- Energiaa säästävien toimenpiteiden todentaminen ja siirto kuljetusyrityksiin, kuorma- ja linja-autoliikenteen energiansäästösopimusten tukeminen, seuranta-järjestelmien kehitystyö
- Uuden ajoneuvotekniikan vaikutukset taajamailman laatuun (NO₂/PM)

Projektin tavoitteet ovat hyvin linjassa EU tason linjausten kanssa. Huhtikuussa 2009 annettiin direktiivi (2009/33/EY) ympäristöystävällisten ja energiatehokkaiden ajoneuvojen edistämisestä. Direktiivin tavoitteena on sisällyttää julkisen sektorin ajoneuvojen hankintaan pakollinen vertailuperuste, joka ottaa huomioon ajoneuvon käytönaikaisen energiankulutuksen, hiilidioksidipäästöjen sekä saastepäästöjen kustannukset. Lisäksi direktiivi edellyttää, että julkisen liikenteen palvelut, jotka perustuvat julkisen viranomaisen myöntämään lisenssiin, lupaan tai auktorisointiin toteutetaan liikennevälineillä, joiden hankinnassa sovelletaan tätä periaatetta.

Direktiivi määrittelee, miten kustannukset on laskettava. Vertailun tulisi perustua kilometripohjaisiin polttoaineenkulutus-, CO₂- ja päästöarvoihin (2009/33/EY):

”Polttoaineen kulutuksen, CO₂-päästöjen ja saastepäästöjen määrien ajokilometriä kohden tulee perustua standardoituihin EU-testimenetelmiin niiden ajoneuvotyyppien

osalta, joille on määritelty testimenetelmät EU:n tyyppi hyväksyntää koskevassa lainsäädännössä. Niiden ajoneuvojen osalta, joille ei ole olemassa standardoituja EU-testimenetelmiä, tarjousten vertailun tulisi pohjautua laajasti tunnustettuihin testimenetelmiin, tai viranomaista varten tehtyihin testeihin tai näiden puuttuessa, valmistajien toimittamiin tietoihin.”

Sekä edeltäneessä HD Energia-projektissa että nyt raportoitavassa RASTU-kokonaisuudessa on itse asiassa generoitu polttoaineenkulutus- ja päästödataa juuri direktiivin edellyttämässä muodossa direktiivin tarkoitusperiin. Eri asia on sitten se, että direktiivissä esitetyt laskentasaännöt ajoneuvon elinkaaren aikaisten energia- ja päästökustannusten arvioimiseksi painottaa VTT:n mielestä energiakomponenttia liikaa suhteessa CO₂:een ja varsinaisiin päästökomponentteihin.

Transport ERA-NET Action Group ENT9, jonka otsikko on “Environmental performance indicators for heavy duty vehicles”, on verkosto, jonka avulla on pyritty rakentamaan kansainvälistä yhteistyötä raskaan kaluston todenmukaisen energian kulutuksen ja ympäristöpäästöjen määrittämisen aihepiirissä. Käytännössä tämä tarkoittaa alustadynamometrillä tapahtuvan mittaus toiminnan ”standardointia”, alkuvaiheessa keskeisten tutkimustoimintaa harjoittavien laboratorioden käytäntöjen yhdenmukaistamista. Alustadynamometri mittauksen mukaan ottaminen varsinaisiin normeihin tai jopa tyyppi hyväksymissäädöksiin on tietysti toivottavaa, mutta nopeaa edistymistä ei ole realistista odottaa.

RASTU-hankkeeseen sisältyi yhteensä 10 alaprojektia (9 tutkimuksellista alaprojektia, vastuutahot suluissa):

1. Euro IV/V/EEV –autojen suorituskyky (VTT)
2. Euro IV/V/EEV –autojen poltto- ja voiteluaineet (VTT)
3. Ajoneuvotekninen kehitystyö (TKK, VTT)
4. Ajoneuvojen IT-sovellukset (VTT, OY)
5. Linja-autojen liikennöinnin optimointi (VTT)
6. Kuorma-autoalan energiatehokkuuden hallinta- ja kannustinjärjestelmät (TTY, EC Tools)
7. Energiansäästötoimenpiteiden tehokkuuden arviointi (VTT, TTY)
8. Menetelmäkehitys (VTT)
9. Pakokaasututkimus (VTT)
10. Koordinaatio ja viestintä (TEC TransEnergy Consulting Oy, VTT, Motiva)

Hankkeen raportit ovat saatavissa projektin verkkosivuilta osoitteesta www.rastu.fi.

RASTU:n vuotuinen budjetti oli noin 800 000 € Päärahoittaja oli Tekes – teknologian ja innovaatioiden kehittämiskeskus ja sen ClimBus-teknologiaohjelma. Muita rahoittajia ovat mm. Ajoneuvohallintokeskus AKE, Liikenne- ja viestintäministeriö, Helsingin kaupungin liikennelaitos HKL ja Pääkaupunkiseudun Yhteistyövaltuuskunta YTV. Lisäksi hanketta rahoittaa joukko yrityksiä ja kuljetusliikkeitä. Täydellinen listaus rahoittajista on esitetty liitteessä 1.

Ulkomaalaisia rahoittajia oli kaksi, Ranskan energiaviranomainen ADEME ja Ruotsin tiehallinto Vägverket. Englanninkielinen suomenkielistä suppeampi raportointi tapahtui ensisijaisesti näitä rahoittajia ajatellen.

Luvusta 2 eteenpäin esitetään osatehtäväkohtaisesti vuoden 2008 tulokset sekä yhteen-
veto koko projektin aikaisista tuloksista.

2 EURO IV/V/EEV –AUTOJEN SUORITUSKYKY

Vastuutaho: VTT

Teksti: Kimmo Erkkilä, Petri Laine & Nils-Olof Nylund

2.1 KAUPUNKIBUSSIEN MITTAUKSET

2.1.1 Yleistä

Vuoden 2008 kaupunkibussimittauksissa oli uusi ”Environmentally Enhanced Vehicle” (EEV) -kalusto vahvasti edustettuna. RASTU-projektin mittausten lisäksi tietokantaan vietiin ajoneuvoja rinnakkaisista projekteista. Kaikki mittaukset huomioiden kasvoi kaupunkibussien päästötietokanta yli 100 kappaleeseen (vuodesta 2002). Mitatut ajoneuvotyypit on päästöluokittain kerätty taulukkoon 2.1.

Taulukossa 2.2 on esitelty vuonna 2008 RASTU-projektin päästötietokantaan lisätyt ajoneuvot. Väreillä merkityjä erikoistapauksia ei ole käytetty eri autotyyppien keskiarvojen määrittelyissä. Erikoistapauksia ovat vihreällä merkityt jälkiasennuskatalyysaattoreilla varustetut sekä punaisella merkityt, kevytrakenteiset ajoneuvot. Mitattujen autojen joukossa on sekä uusia autotyyppisiä että jatkuvassa seurannassa olevia vanhempia autoja.

Diesel vehicles:		CNG vehicles:	
Euro 1	2 pcs	Euro 2	2 pcs
Euro 2	29 pcs	Euro 3	7 pcs
Euro 3	30 pcs	EEV	16 pcs
Euro 4	17 pcs	Total.	25 pcs
Euro 5	4 pcs		
EEV	10 pcs		
Total.	92 pcs		

Taulukko 2.1. Päästötietokannan autotyypit päästöluokittain ja polttoaineen mukaan jaoteltuna

Taulukko 2.2. Mitatut kaupunkibussit 2008

2008	Identification	lic.no.
Volvo	Brand A (MY98) Euro 2	MGZ-761
MB	Brand B (MY00) Euro 2	ZIX-290
Renault	Brand F (MY01) Euro 2	JEI-757
Scania	Brand C (MY02) Euro 3	LMF-653
Scania	Brand C (MY02) Euro 3	SHF-703
Scania	Brand C (MY06) Euro 4	FHF-273
Scania	Brand C (MY06) Euro 4	GHI-785
Scania	Brand C (MY06) Euro 4	MRG-632
Volvo	Brand A (MY08) EEV	FIK-771
Scania	Brand C (MY08) EEV	CGP-953
Scania	Brand C (MY08) EEV	UCF-578
Scania	Brand C (MY08) EEV	RPG-548
Iveco	Brand E (MY07) EEV	BBY-981
Scania	Brand C (MY07) Euro 4 3-axle	BVI-662
Volvo	Brand A (MY06) Euro 5, 3-axle	OXI-671
Volvo	Brand A (MY06) Euro 5, 3-axle	OXI-699
Scania	Brand C (MY08) EEV, 3-axle	YHC-899
MAN	Brand D (MY06) EEV,CNG 3-axle	ZCI-919
MAN	Brand D (MY07) EEV,CNG	JGZ-922
MAN	Brand D (MY05) EEV,CNG	CYU-745
MB	Brand B (MY01) EEV,CNG	LJF-784
Volvo	Brand A (MY00) Euro 2, PDPF	ZIX-131
Scania	Brand C (MY05) Euro 3, PDPF	GFK-597
Scania	Brand C (MY04) Euro 3, CRT	CYJ-896
Kabus	Brand G (MY07) Euro 4	-
VDL	Brand H (MY06) EEV	BR-ZL-75

Scanian EGR-tekniikalla toteutetut EEV-bussit toivat vuonna 2008 mielenkiintoisen vertailukohdan EEV-tasoiselle SCR-tekniikalle. Pääosin EEV-ajoneuvojen tulokset olivat tyydyttäviä. Scania EEV-ajoneuvojen joukossa todettiin kuitenkin yllättäviä tuloksia, jotka poikkeavat merkittävästi ryhmän ns. normaalitasosta.

Taulukkoon 2.3 on kerätty uusilla tuloksilla päivitetetyt päästökertoimet keskusta-ajoon (Braunschweig) ja kaupunkien pääväylille (Helsinki 3).

Taulukko 2.3. Päivitetyt kaupunkibussien päästökertoimet.

Emission chart, updated 7.5.2009

Braunschweig	CO g/km	HC g/km	CH4* g/km	NOx g/km	PM g/km	CO2 g/km	CO2 eqv g/km	FC kg/100km	FC MJ/km
Diesel Euro 1	1.39	0.32	0.00	15.59	0.436	1219	1219	38.6	16.4
Diesel Euro 2	1.48	0.19	0.00	12.94	0.202	1270	1270	41.0	17.4
Diesel Euro 3	0.80	0.14	0.00	8.64	0.195	1189	1189	38.2	16.2
Diesel Euro 4	2.84	0.10	0.00	8.35	0.112	1194	1194	38.5	16.4
Diesel Euro 5**	2.84	0.10	0.00	8.35	0.087	1194	1194	38.5	16.4
Diesel EEV	1.12	0.02	0.00	5.87	0.062	1116	1116	36.4	15.5
CNG Euro 2	4.32	7.12	2.33	16.92	0.009	1128	1283	42.1	20.1
CNG Euro 3	0.14	1.67	1.14	9.36	0.011	1257	1295	46.2	22.0
CNG EEV	2.27	1.04	0.87	3.18	0.007	1275	1294	46.3	22.7

* For diesel CH4 = 0

** Euro 5 emission factors are estimated by Euro 4 results

-0.296451 -0.444036 -0.065109

-0.054246

-0.049611

-0.124496

Emission chart, updated 7.5.2009

Helsinki3	CO g/km	HC g/km	CH4* g/km	NOx g/km	PM g/km	CO2 g/km	CO2 eqv g/km	FC kg/100km	FC MJ/km
Diesel Euro 1	1.12	0.26	0.00	12.63	0.353	988	988	31.1	13.2
Diesel Euro 2	1.20	0.16	0.00	10.48	0.163	1029	1029	33.0	14.0
Diesel Euro 3	0.65	0.11	0.00	7.00	0.158	963	963	30.8	13.1
Diesel Euro 4	2.30	0.08	0.00	6.76	0.090	967	967	31.0	13.2
<i>Diesel Euro 5*</i>	<i>2.30</i>	<i>0.08</i>	<i>0.00</i>	<i>6.76</i>	<i>0.070</i>	<i>967</i>	<i>967</i>	<i>31.0</i>	<i>13.2</i>
Diesel EEV	0.90	0.01	0.00	4.76	0.050	904	904	29.4	12.5
CNG Euro 2	3.50	5.76	1.89	13.70	0.007	914	1039	33.9	16.2
CNG Euro 3	0.11	1.35	0.92	7.58	0.009	1018	1049	37.2	17.8
CNG EEV	1.84	0.84	0.70	2.58	0.006	1032	1048	37.3	18.3

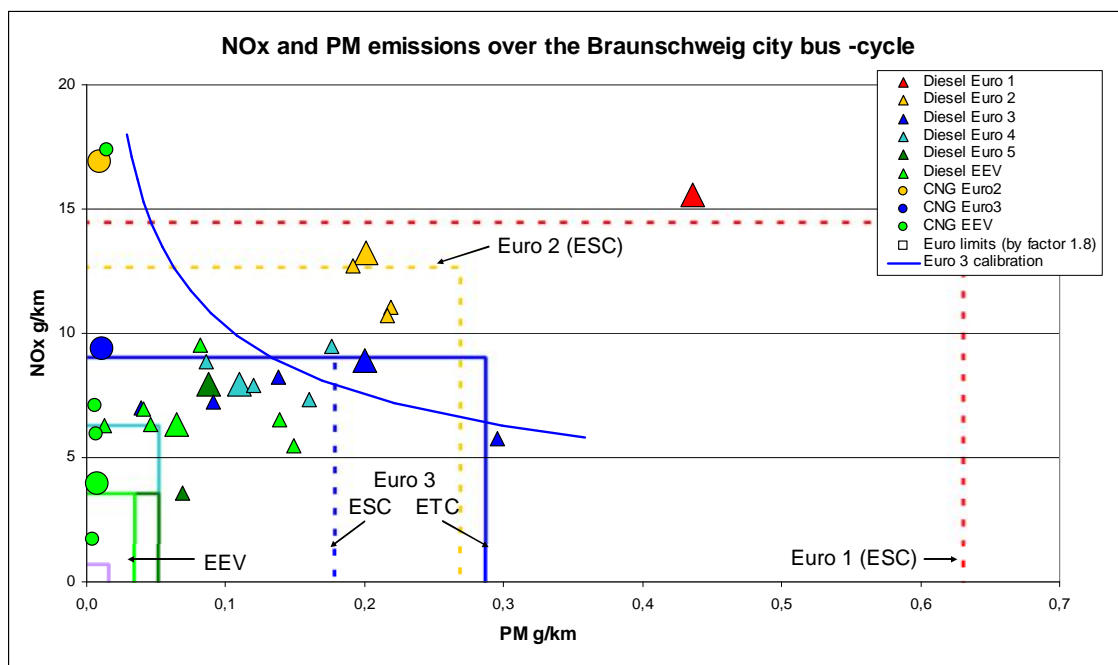
* For diesel CH4 = 0

** Euro 5 emission factors are estimated by Euro 4 results



2.1.2 Typen oksidit ja partikkelit

Kuvassa 2.1 on esitetty uusimpien mittausten päästötulokset typen oksideille (NO_x) ja hiukkasille (PM). Vertailukohtana käytettävät kaikkien päästöluokkien keskiarvotulokset on esitetty suurempina kolmioina ja ympyröinä. Kuvaan on merkitty Euro III-autojen osalta sekä ESC- (European Steady Cycle) että ETC (European Transient Cycle) -moottoritesteihin perustuvat raja-arvot. Ennen Euro III-tasoa raja-arvot perustuivat R.49-testin (ESC:tä edeltänyt staattinen testi) tuloksiin. Uudempien autojen (Euro IV ja Euro V/EEV) rajat taas perustuvat ETC-sykliin. Molemmissa tapauksissa kertoimena moottoritestien suhteuttamiselle Braunschweig-syklin tuloksiin on 1,8. Kerroin saadaan testissä käytettävästä työmäärästä suhteessa ajomatkaan (kWh/km).

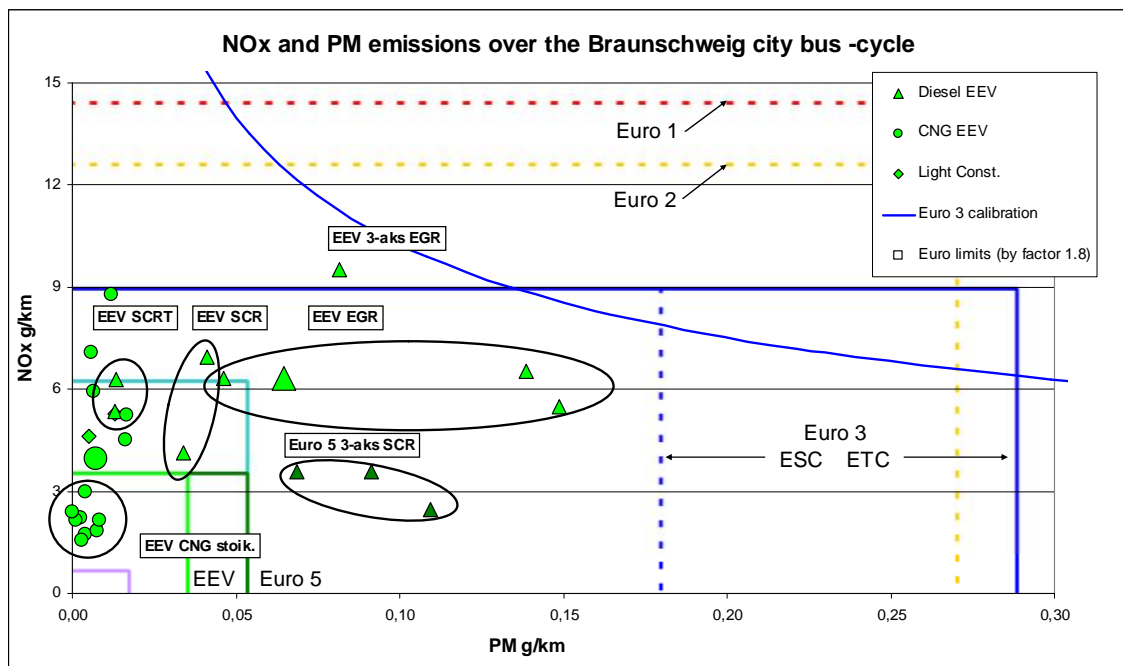


Kuva 2.1. Kaupunkibussin typen oksidi- (NO_x) ja partikkeli- (PM) -päästöt ajomatkan suhteen. Vuoden 2008 yksittäisten mittausten tulokset on merkitty pienillä kolmioilla tai ympyröillä, kaikkien tulosten keskiarvot päästöluokittain on merkitty suurilla kolmioilla (dieselbussit) tai ympyröillä (kaasubussit).

Vuoden 2008 tulokset ovat yhdenmukaisia aiempien vuosien mittausten kanssa. Euro III-autot sijoittuvat Euro III kalibraatio-käyrälle. Kaksi Euro III-autoa antoi keskimääräistä huomattavasti paremman partikkeliemissiotuloksen. Toinen autoista oli varustettu CRT- ja toinen pDPF- suodattimella. CRT-suodattimella varustetun yksilön päästötulos oli huomattavan alhainen, jopa EEV-keskitasoa hiukan parempi. Sen sijaan pDPF-suodattimella varustettu yksilö toimi kuten keskimääräinen Euro V-auto. Suhteessa Euro III-keskitasoon CRT-suodattimella varustetulla ajoneuvolla PM-päästö aleni 80 %. pDPF-suodatin on vastaavasti vähentänyt PM päästöä 53 %. Euro IV-autojen tulokset mukailevat edellisvuosien tuloksia ja sijoittautuvat odotetusti Euro III-autojen tasolle. Kaikki uudet Euro IV-tulokset on mitattu Scania EGR-autoilla.

Mielenkiintoisimpana joukkona kuvassa 2.2 esiintyy usealla yksilöllä lisääntynyt diesel EEV-sarja. NO_x -päästötaso EEV-autoissa on Braunschweig-syklissä käytännössä Euro IV-raja-arvon luokkaa. Ryhmän sisällä NO_x-päästö on samaa tasoa kaikilla automerkeillä. Merkillepantavaa on ajoneuvojen PM-päästöjen voimakas hajonta. Matalimmat partikkelipäästöt mitattiin Ivecon SCRT-järjestelmällä (SCR-katalysaattori + varsinainen hiukkassuodatin) varustetuilla ajoneuvoilla. Korkeimmat partikkelipäästöt ja voimakkain ryhmän sisäinen hajonta, aina Euro III-tasolle saakka, nähdään Scanian EGR-bussien päästöissä.

Maakaasukäyttöisistä ajoneuvoista seurannassa oleva stoikiometrisella seoksella toimiva MAN EEV antoi poikkeuksellisen korkean (7 g/km) NO_x-päästön ja sijoittui MAN-laihaseosbussien tasolle. Toinen mitattu stoikiometrinen MAN antaa kyseiselle ajoneuvolle tyypillisen tuloksen, ja sijoittuu selvästi EEV-rajan sisäpuolelle. Vuonna 2008 mitattiin myös Mercedes-Benz -laihaseosmoottorilla varustettu auto, johon oli tehty Euro 2 → EEV päivitys. Päivitetty ajoneuvo antoi kuitenkin Euro 2-luokalle tyypillisen tuloksen (kuva 2.1). Tuloksesta nähdään selvästi, että päivityksen vaikutus päästöihin oli tässä tapauksessa olematon.



Kuva 2.2 Euro V/EEV kaupunkibussin typen oksidi- (NO_x) ja partikkeli- (PM) – päästöt ajomatkan suhteen. Mittauksia 2006-2008

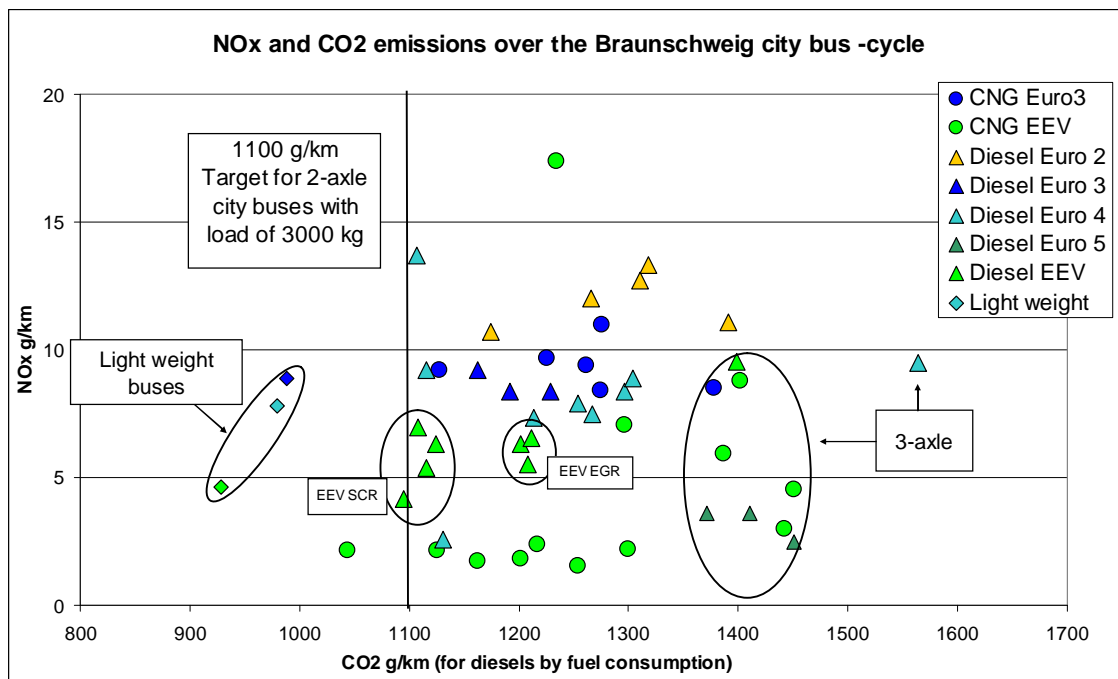
2.1.3 Hiilidioksidipäästöt ja energiatehokkuus

Kuvassa 2.3 on esitetty kaupunkibussien hiilidioksidi- (CO₂) ja typen oksidi- (NO_x) päästöt. Kuvasta voidaan havaita uusien dieselmoottoristen EEV-ajoneuvojen sijoittuminen energiatehokkuuden osalta: SCR tekniikalla varustetut ajoneuvot antavat CO₂ tuloksia lähelle 1100 g/km, jota voidaan pitää tavoitearvona (”bench mark”) normaali-

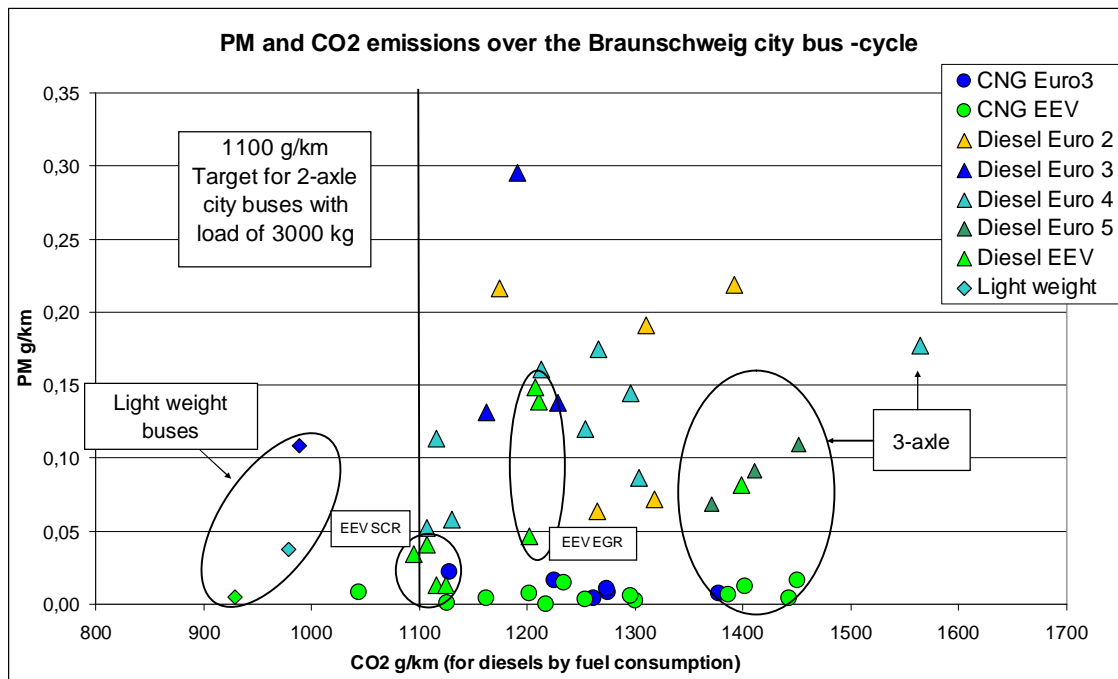
rakenteiselle kaupunkibussille. EGR-tekniikalla varustettujen EEV-ajoneuvojen CO₂ tulos on keskimäärin 1200 g/km.

Vuonna 2008 mitatut 3-akseliset ajoneuvot sijoittautuvat odotetusti 1400 g/km tietämillä. Kolmiakselisten autojen sarjaan lisättiin uusi ajoneuvotyyppi; Scania Euro IV. Mitatun yksilön NO_x- ja PM-päästöt olivat Euro IV-luokalle ominaiset, mutta CO₂ päästö korkea, n. 1550 g/km. Keskimääräinen kolmiakselinen ajoneuvo on tätä yksilöä noin 10 % energiatehokkaampi. Mitatut Volvo Euro V- ja MAN EEV-autot antoivat luokilleen tyypilliset tulokset.

Kuvassa 2.4 nähdään CO₂ päästöt PM-päästöjen suhteen. Kaasuautojen kanssa hyvin alhaiselle partikkelipäästötasolle yltävät Ivecon SCRT-autot. SCR-tekniikalla varustettujen ajoneuvojen tulokset ovat lupaavia. Uusi tekniikka on alentanut kaupunkibussien päästötasoa merkittävästi, ja samalla uuden tekniikan autot ovat selvästi edeltäjiensä energiatehokkaampia. Kuvista 2.3 ja 2.4 käy kuitenkin kiistatta ilmi kevytrakennetekniikan energiankäyttöetä perinteiseen bussikalustoon nähden. Kuvissa esiintyvät diesel-autojen CO₂-lukemat on määritelty punnitun polttoaineenkulutuksen perusteella, joten mittatarkkuus on hyvä, mittauserätarkkuuden ollessa noin ±1 %. Maakaasuautojen tulokset ovat puolestaan suoraan CO₂-päästömittaustuloksia, jolloin epävarmuus on suurempi, noin ±15 %.



Kuva 2.3. Kaupunkibussien hiilidioksidi- (CO₂) ja typen oksidi- (NO_x) -päästöt.



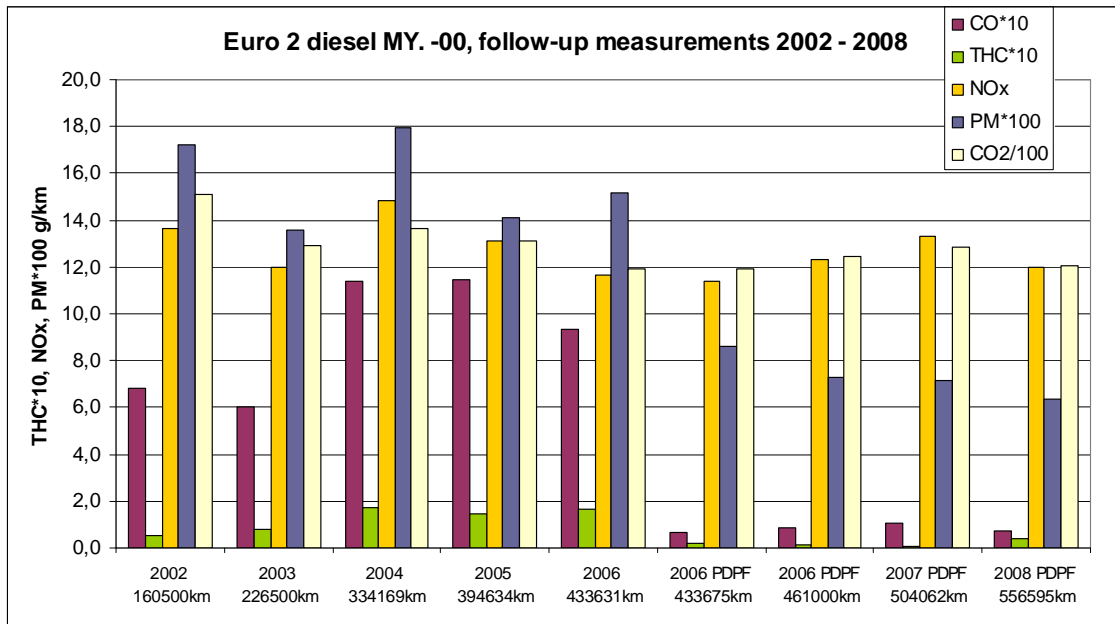
Kuva 2.4. Kaupunkibussien hiilidioksidi- (CO_2) ja partikkelimassa- (PM) -päästöt.

2.1.4 Seuranta-autot

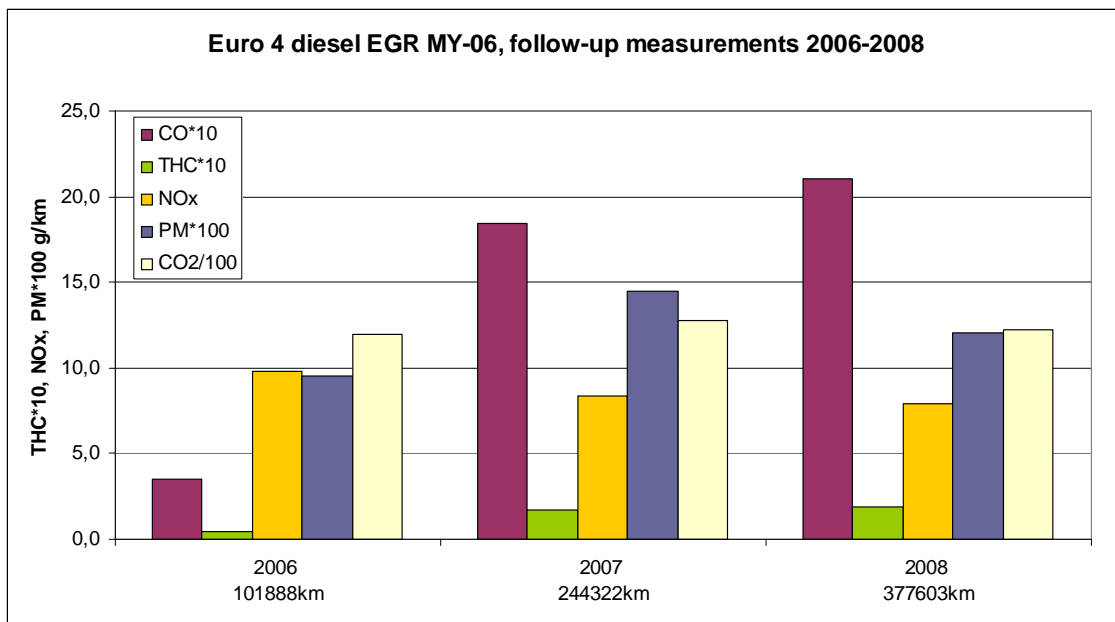
Kuvassa 2.5 on pitkäaikaisseurannassa olevan Volvo-merkkisen Euro 2-kaupunkibussin tuorein seurantatulokset. Ajoneuvon päästöt ovat pDPF-jälkiasennussuodattimen asentamisen jälkeen pysyneet tasaisina. Vuoden 2008 seurantamittaus ei osoita autolle tyypillisen heilahtelun lisäksi minkäänlaista alkavaa nousua päästöissä ja ajoneuvon voidaan katsoa olevan edelleen normaalissa toimintakunnossa. Kuvasta on syytä huomioida ajoneuvon vuotuisissa kilometrisuoritteissa havaittava ero.

2002-mallisen Scania-merkkisen Euro III-auton (ZOF-209) seuranta keskeytettiin vuonna 2008, koska kyseinen ajoneuvo on poistunut yhteistyökumppanien kalustosta. Seurannan aikana havaittiin hapettavan jälkiasennuskatalysaattorin toimintatehon hiipuminen. Tässä tapauksessa uusiminen 200 000-300 000 kilometrin ajon jälkeen olisi ollut tarpeen.

EGR-tekniikalla varustetun Euro IV-ajoneuvon vuoden 2008 seurantamittaus osoittaa mielenkiintoista kehitystä päästökomponenteissa. Kuvasta 2.6 nähdään, että CO -päästö on vuodentakaisesta seurannasta lisääntynyt 2,1 g/km nousten näin 5-kertaiselle tasolle alkuperäisestä arvosta. Kokonaishiilivety eli THC-päästöt ovat myös jatkaneet nousua edellisestä mittauksesta (15 %) ja tulos on noin kolmikertaistunut lähtötasosta. Typen oksidit ovat puolestaan laskeneet alkuperäisestä tasosta lähes 20 %. Partikkelipäästö ei myöskään enää noussut, vaan palautui lähtötasolle 0,12 g/km. Auton energiankulutus on pysynyt tasaisena seurannan aikana.



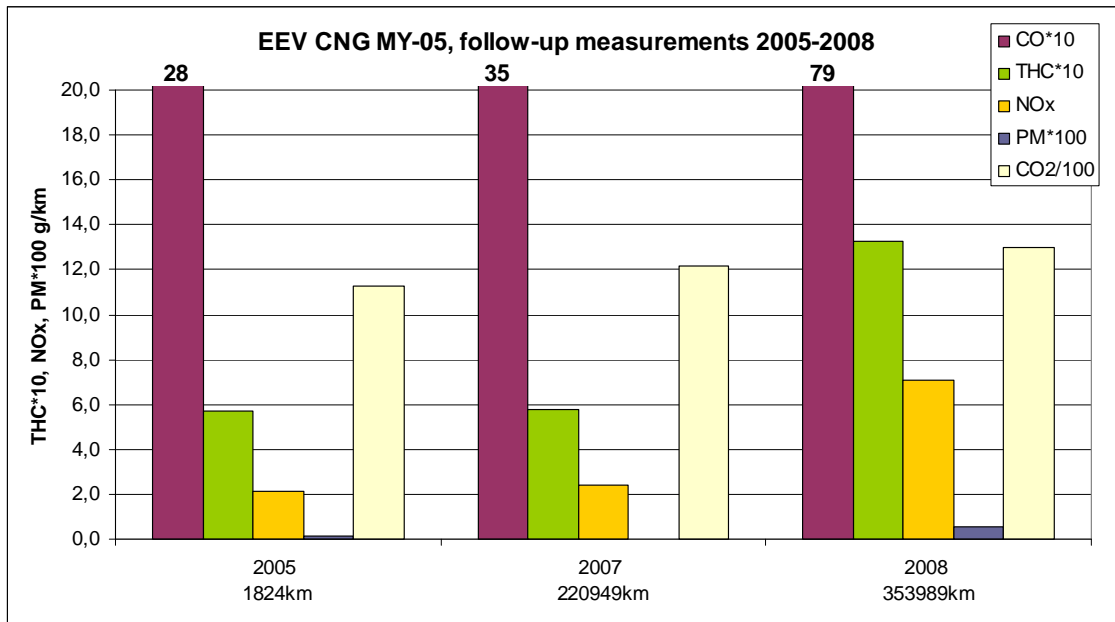
Kuva 2.5. Euro 2 seuranta-auton (ZIX-131, Volvo vm. 2000) päästötulokset vuosilta 2002 – 2008. Vuonna 2006 autoon on asennettu pDPF-puhdistin (FK= Proventia pPDF).



Kuva 2.6. Euro IV EGR seuranta-auton (MRG-632, Scania vm. 2002) päästötulokset vuosilta 2006 - 2008.

Stoikiometrisella seossuhteella toimivan MAN EEV-maakaasuauton päästöt kasvoivat merkittävästi aiempiin tuloksiin verrattuna (kuva 2.7). NOx-päästöt olivat lähes 3-kertaistuneet lähtötasoonsa nähden. Myös PM- ja CO-päästöissä nähdään voimakasta

kasvua. Seuranta-auton tulos oli poikkeava verrattuna laajaan joukkoon vastaavia ajoneuvoja ja onkin mahdollisesti osoitus ajoneuvon laitteistoviasta.



Kuva 2.7. EEV maakaasu (CNG) – seuranta-auton (CYU-745, MAN vm. 2005) päästötulokset vuosilta 2005 ja 2008.

2.1.5 Yhteenveto

Jakson 2006 – 2008 mittauksista voidaan päätellä uusimpien EEV-dieselbussien todelliset päästötulokset hajoavat erittäin paljon. Parhaat tulokset asettuvat ongelmallisten tyyppien oksidien ja partikkelipäästöjen osalta EEV-autoille asetettujen päästörajojen tuntumaan, mutta keskimäärin tilanne on huonompi. Suurin joukko EEV-autoista asettuu NOx-päästöissä Euro IV rajan tuntumaan ja partikkelit tekniikasta riippuen joko alle puoleen rajasta, tai toisessa ääripäässä jopa noin nelinkertaisiin lukemiin.

Toisaalta vaikka EEV autojen todelliset päästöt ovat keskimäärin vain Euro IV tasoa, ovat ne kuitenkin selvästi Euro IV autoja puhtaampia, sillä myöskään ne eivät todellisuudessa saavuttaneet asetettuja rajoja. Edellä taulukossa 2.3 esitettyjen päästökertoimien mukaisesti EEV autojen NOx päästöt ovat olleet mittauksissa keskimäärin n. 30 % matalammat ja PM päästöt keskimäärin n. 45 % matalammat kuin Euro IV autoilla keskimäärin. Suurta eroa partikkeleissa selittää toisaalta se että muutamissa EEV-bussityypeissä on partikkelisuodatin ja toisaalta otoksessa mukana olleiden eri bussimallien väliset merkittävät erot.

Jakson aikana tehdyt mittaukset myös osoittavat että samanaikaisesti päästömääräysten tiukentuessa myös energiatehokkuus on parantunut. Mittauksissa käyneet uusimmat EEV bussit ovat keskimäärin kuluttaneet n. 5 % vähemmän kuin Euro III ja IV –bussit ja yli 10% vähemmän kuin Euro II -bussit.

2.2 KUORMA-AUTOJEN MITTAUKSET

2.2.1 Yleistä

Kuorma-automittauksia on tehty eri painoluokissa: 18 t, 26 t, 42 t ja 60 t. Kaikkiaan VTT:n ajoneuvotietokanta kuorma-autojen osalta on RASTU tulosten myötä mittava ja se edustaa nykyhetkellä käytössä olevaa kalustoa erinomaisesti. Tietokanta Euro IV tason autojen suorituskyvystä on tärkeä käytössä olevan ajoneuvokaluston ympäristövaikutusten arvioimisessa. Toisaalta seuranta-autojen mittaukset antavat lisäinformaatiota näiden ajoneuvoluokkien suorituskyvyn stabilisuudesta kilometrikertymän suhteen. Seurantatulosten merkitys korostuu, arvioitaessa liikenteen vaikutuksia pitämällä aikavälillä.

Aiemmin HDenergia-projektissa tehtiin vastaavissa painoluokissa automallikohtaisia vertailuja Euro III autoille ja Rastun aikaisemmissa vuosiraporteissa on raportoitu Euro IV autojen mittauksista. Samaan tarkoitukseen suunniteltujen ja samaa päästötasoa edustavien autojen kulutustuloksissa nähdään tyypillisesti jopa 10 - 15 %:n.

Vuonna 2008 täydennettiin 18 t painoluokan tutkimusta mittaamalla neljä uutta yksilöä Euro IV-päästöluokassa. Loppuvuodesta tietokantaa lisättiin tuntuvasti myös 42 t painoluokassa. Neljästä uudesta yksilöstä peräti kolme oli uusia Euro V-ajoneuvoja. Yhteenvetokuvissa on kaikkien kolmen vuoden mittauksen tulokset (kuvat 2.8-2.12). Euro III-autojen tulokset ovat kyseisen luokan keskiarvoina kullekin kolmelle kuormalle, Euro IV- ja Euro V-ajoneuvoista kuvissa on kunkin yksittäisen ajoneuvon tulos samoin kolmella kuormalla. Pääsääntöisesti työmäärää kohti lasketut päästöt laskevat auton kuorman kasvaessa, joskin pakokaasujen jälkikäsitteilytekniikoilla varustetuilla Euro IV- ja Euro V-luokkien autoilla saattaa vain partikkeli- tai NO_x päästö laskea toisen komponentin pysyessä lähes muuttumattomana.

Euro luokkien päästörajat on skaalattu ylöspäin kertoimella 1,5 kuvaamaan vetäviltä pyöriltä mitattuja päästötuloksia. Kerroin 1,5 on arvio voimalinjan, renkaiden ja apulaitteiden aiheuttamista häviöistä, tyypillisesti häviöt ovat pienemmät. Esim. Euro 4 – luokassa päästöjen raja-arvot ETC-moottorikoikeessa ovat 3,5 g/kWh NO_x:ille ja 0,03 g/kWh hiukkasille. Soveltamalla kerrointa 1,5 näihin arvoihin (ilman erillistä NTE-kerrointa) alustadynamometrimittauksen Euro 4 – autojen vertailuarvoiksi saadaan noin 5 g/kWh NO_x:lle ja 0,05 g/kWh hiukkasille. Tämä on ainoastaan karkea arvio, koska häviökerroin riippuu todellisuudessa mm. kuormitustasosta ja ajosyklistä.

Kaikissa autoluokissa on esitetty kuva, johon on merkitty sekä polttoaineen- että urean kulutus. 42-tonnisten luokassa tämän kuvan rinnalla on kuva polttoaine- ja ureakustannuksesta, jossa on dieselille käytetty hintaa 1,00 € ja urealle 0,50 € per litra. Tekstissä on kommentoitu taloudellisuutta tarkoittaen polttoaineen ja urean yhteenlaskettua kustannusta (esitetyt prosenttiluvut tarkoittavat nimenomaan eroja polttoaine- ja ureakustannuksen summassa).

2.2.2 42-tonnisten autojen vertailumittaukset

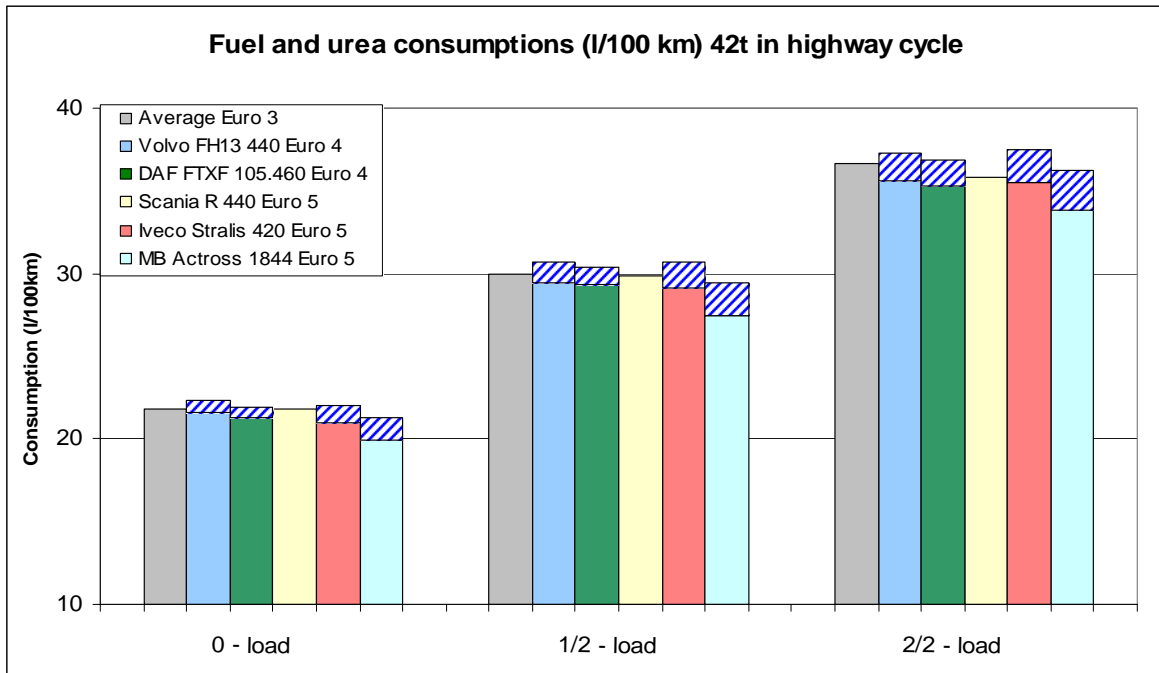
Painoluokkaan 42 tonnia saatiin vuonna 2008 monta mielenkiintoista lisäystä. Uutena merkkinä vertailumittauksissa nähdään DAF, joka tarjosi mittauksiin SCR-tekniikalla varustetun Euro IV-ajoneuvon. Uutta tekniikkaa sarjassa edustavat Iveco ja MB SCR-sekä Scanian EGR-tekniikkaan nojaavat Euro V-ajoneuvot.

Kuvassa 2.8 nähdään merkittäviä eroja maantiesyklin kulutustuloksissa. Urean kustannukset huomioiden (5 – 7 % polttoaineen kulutuksesta) on MB taloudellisin ajoneuvo kyseisessä painoluokassa keskimäärin 5 % erolla epätaloudellisimpaan, kuormituksesta riippumatta (kuva 2.9). Muut ajoneuvot antoivat toisiinsa nähden yhtäläisen tuloksen mittausepätarckkuuden rajoissa (± 1 %).

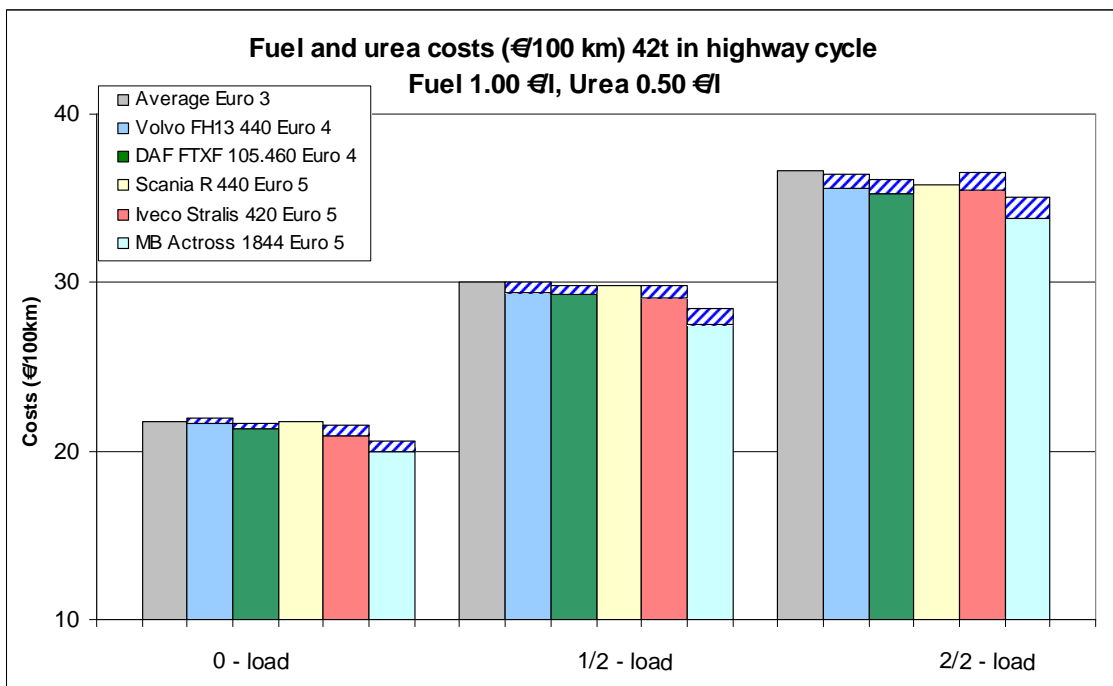
Moottoritiesyklissä taloudellisimpien ajoneuvojen keskinäinen järjestys pysyy samana, mutta niiden keskinäinen ero on pienempi (kulutusluvut kuvassa 2.10). Tähän osaltaan vaikuttaa urean kulutuksen kasvu SCR-autoissa (+ 0,5 %). MB SCR oli edelleen taloudellisin vaihtoehto n. 5 % erolla heikoimpaan. Scania EGR jäi parhaasta tuloksesta noin 2 % -yksikköä ollen seuraavaksi taloudellisin.

Molemmissa sykleissä epätaloudellisin vertailukohta riippuu kuormitustasosta, ts. mikä ajoneuvo ei saanut huonointa tulosta kaikilla kuormilla. Erityisesti moottoritiesyklissä Euro IV- ja Euro V-luokkien autot olivat taloudellisempia kuin keskimääräinen Euro III-luokan auto.

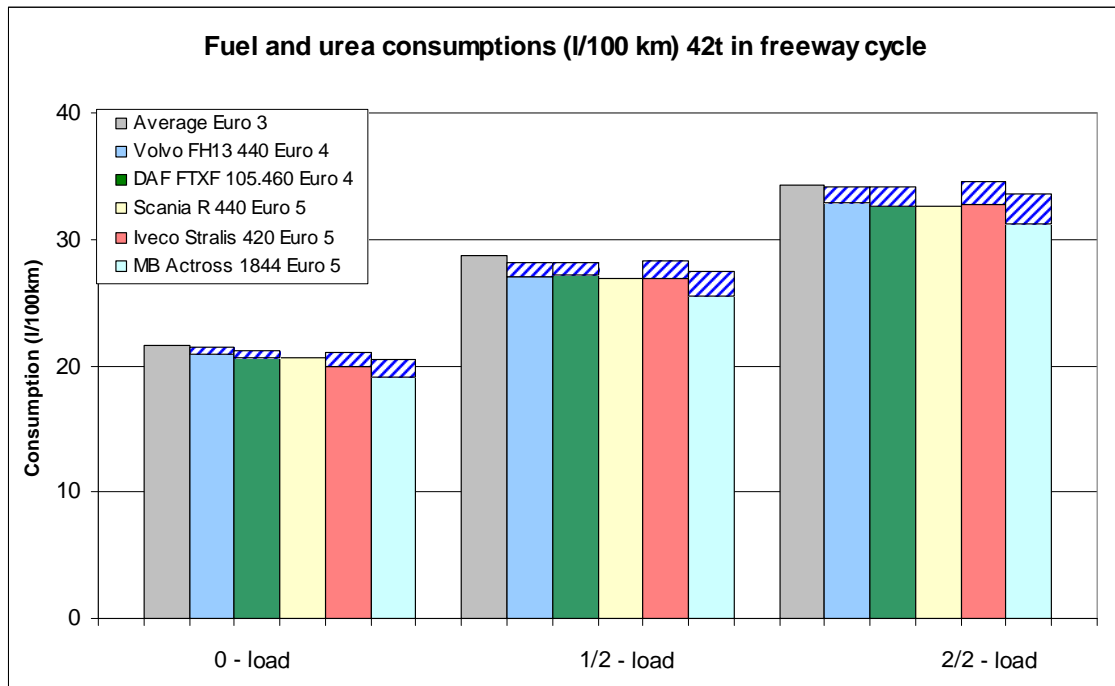
Pakokaasupäästöjen osalta kaikki merkit suoriutuivat maantiesyklissä hyvin ja pysyivät päästöluokan rajoissa. Volvo FE240 Euro IV suoriutui jopa Euro V-tasoisesti (kuva 2.11). Myös moottoritiesyklissä koko uusi 42 t-luokka antoi hyviä tuloksia (kuva 2.12). Euro V- autoista kuitenkin vain Iveco ja Euro IV-luokassa Volvo pysyivät kaikilla kuormituksilla raja-arvojen alapuolella. Vertailukohtana käytettävään Euro III-keskiarvoon nähden ovat todelliset päästöt kaikkien merkkien kohdalla ovat laskeneet merkittävästi.



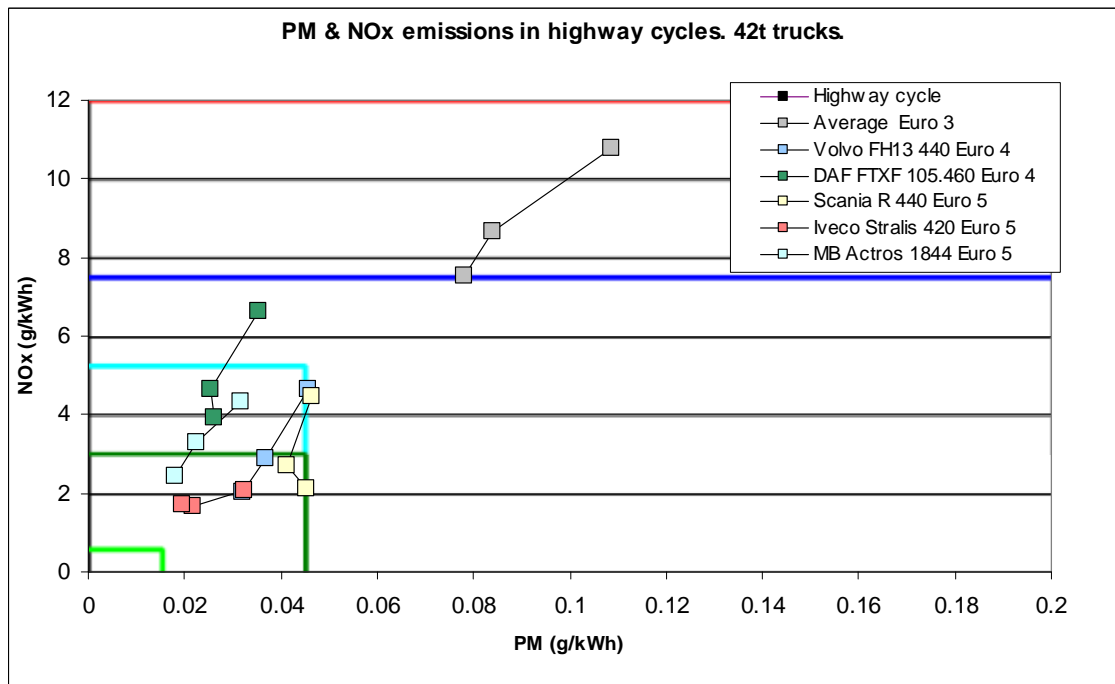
Kuva 2.8. Polttoaineen- ja ureankulutus, 42 t, maantiesykli



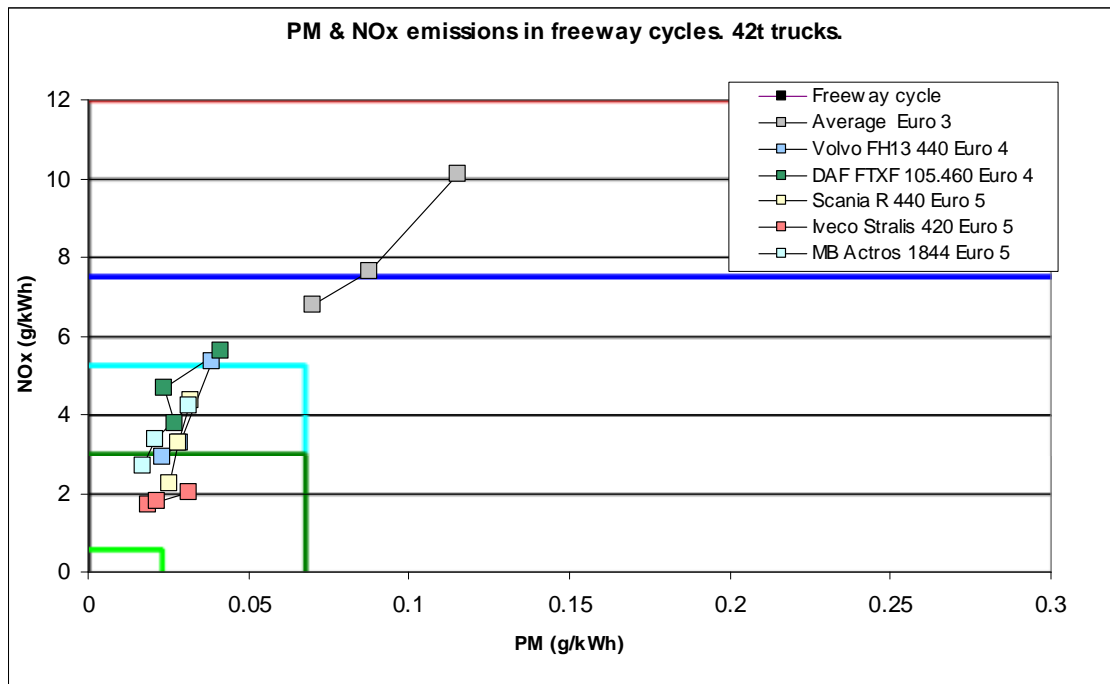
Kuva 2.9. Polttoaine- ja ureakustannukset, 42 t, maantiesykli



Kuva 2.10. Polttoaineen- ja ureankulutus, 42 t, moottoritiesykli



Kuva 2.11. NO_x- ja PM -päästöt vetopyörätyötä kohden, 42 t, maantiesykli.



Kuva 2.12. NO_x - ja PM-päästöt vetopyörätyötä kohden, 42 t, moottoritiesykli.

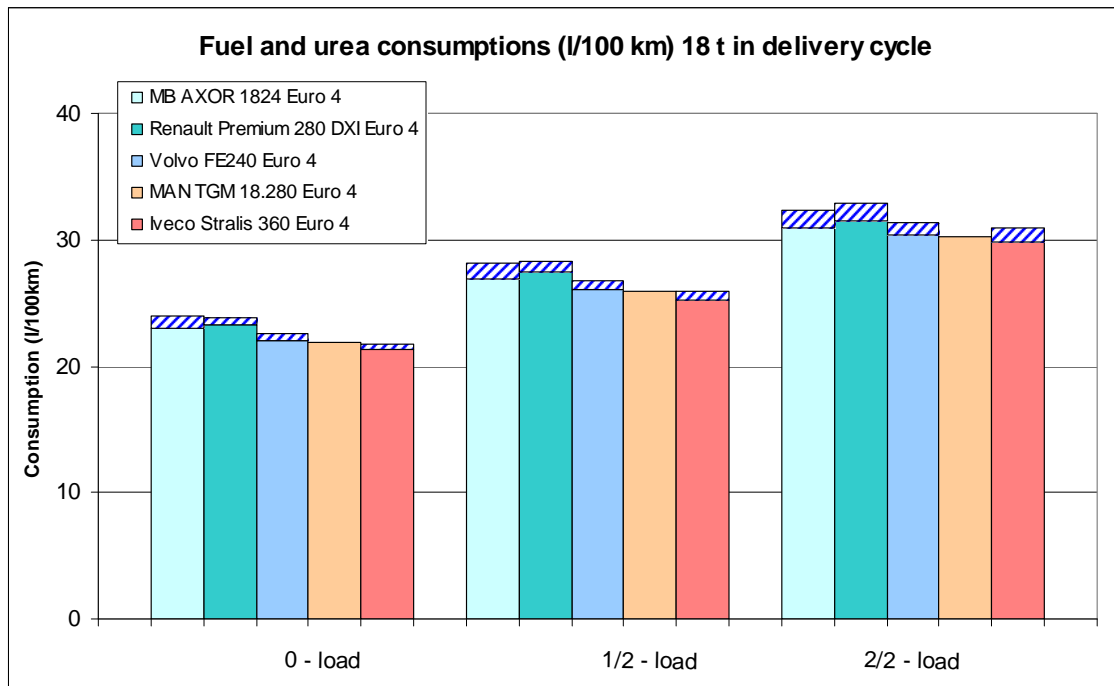
2.2.3 18-tonnisten jakeluautojen vertailumittaukset

Mittasarja 18 tonnin autoille kasvoi neljällä uudella Euro IV-tason ajoneuvolla. Vanhempi Volvo FE 320-tulos korvattiin uudella, teholuokaltaan paremmin sarjaan sopivalta Volvo FE 240:llä.

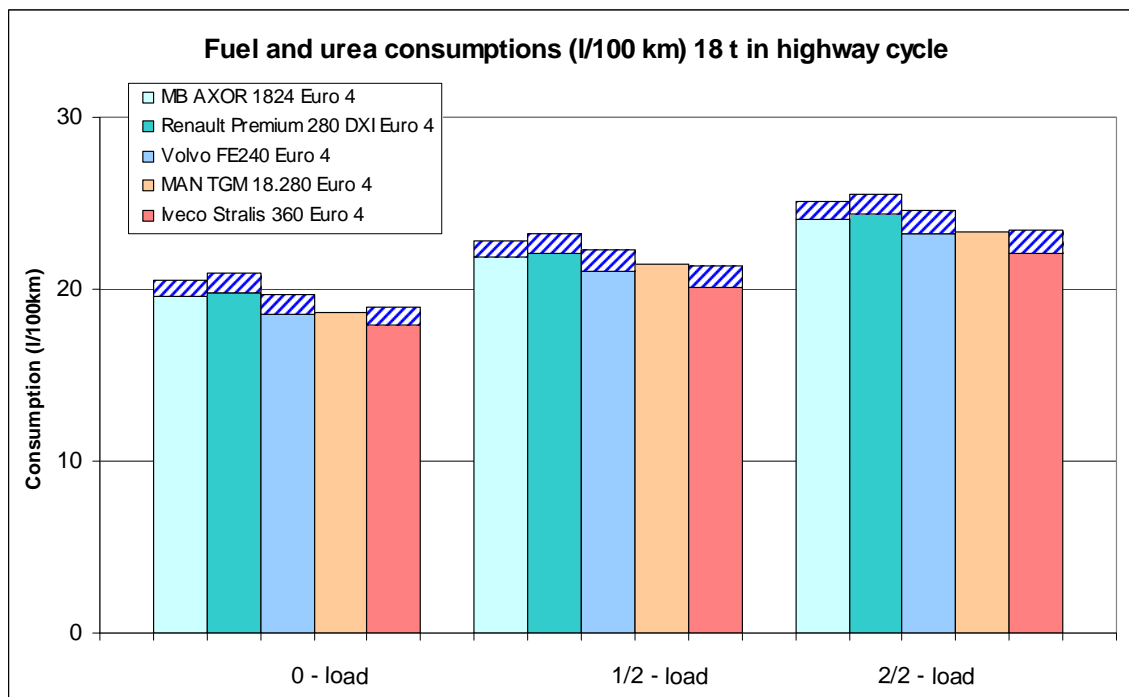
Kuvassa 2.13 on esitetty ajoneuvojen kulutustulokset. Jakelusyklin kulutustuloksissa kustannuksiksi laskettuna, jossa myös urean kulutus on huomioitu, antoi Iveco SCR-tekniikka erinomaisen tuloksen ollen keskimäärin 7 % taloudellisempi kuin epätaloudellisin vaihtoehto kaikilla kuormituksilla. MAN EGR oli vastaavasti kaikissa kuormitusluokissa seuraavaksi taloudellisin keskimäärin 1 % -yksikköä heikommalla tuloksella Iveco SCR:ään nähden.

Kuvassa 2.14 on esitetty kulutustulokset maantiesyklissä. Maantiesyklissä parhaan tuloksen antoi Iveco Stralis Euro IV. Iveco oli keskimäärin 9 % epätaloudellisinta vaihtoehtoa taloudellisempi kaikilla kuormitusasteilla.

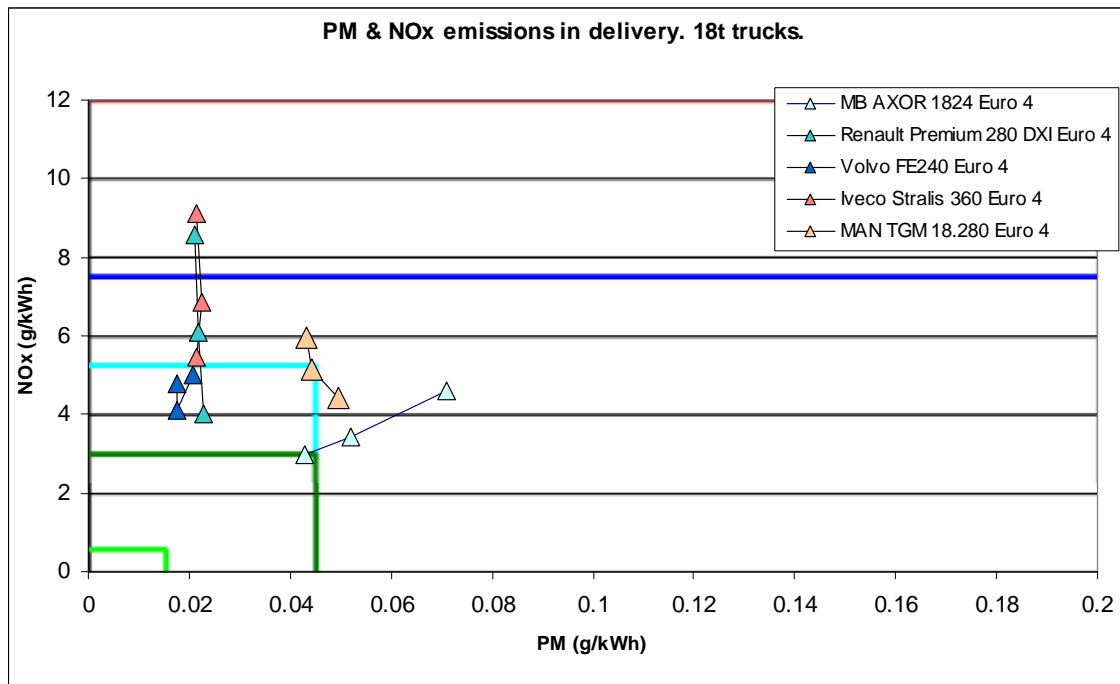
Pakokaasupäästöjen kannalta jakelusykli on selvästi maantie- ja moottoritiesyklejä haastavampi. Volvo FE240 on ainoa yksilö joka pysyi kaikissa kuormissa Euro IV raja-arvojen sisällä tässä syklissä. MB ja MAN suoriutuvat kohtuullisen hyvin tyhjää ajoneuvoa lukuun ottamatta. Ivecon ja Renaultin tuloksissa oli voimakas kuormitussidonnainen hajonta NO_x päästöissä. MB:n tapauksessa sekä NO_x että PM regoivat kuormitukseen (kuva 2.15).



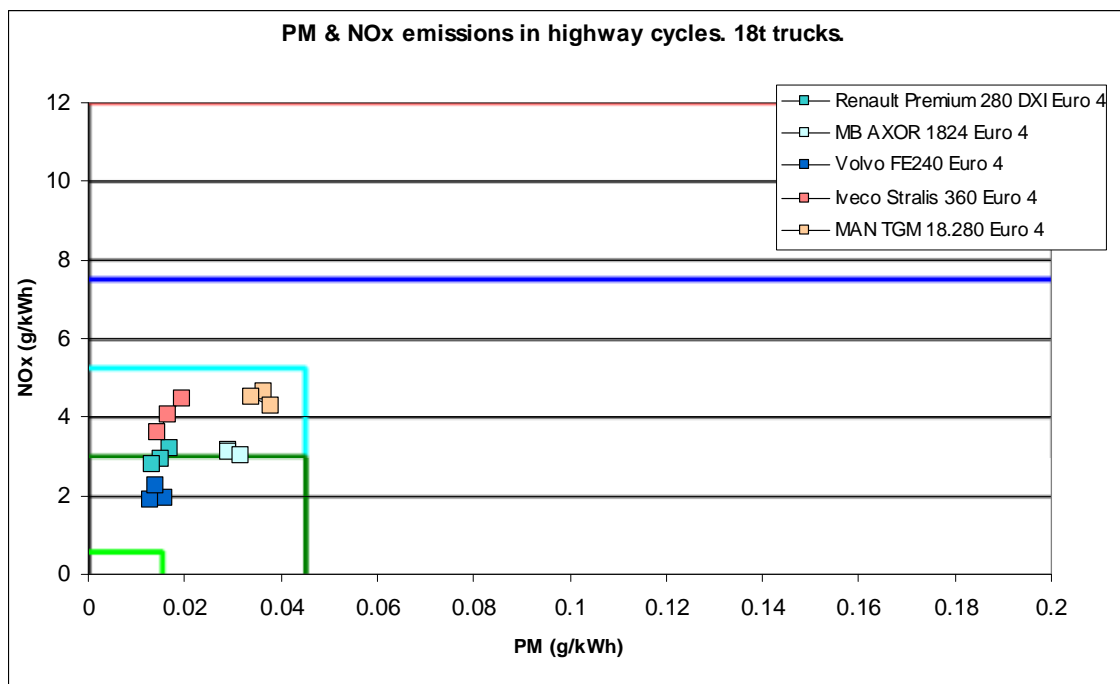
Kuva 2.13. Polttoaineen- ja ureankulutus, 18 t, jakelusykli.



Kuva 2.14. Polttoaineen- ja ureankulutus, 18 t, maantiesykli.



Kuva 2.15. NO_x- ja PM –päästöt vetopyörätyötä kohden, 18 t -jakelusykli.



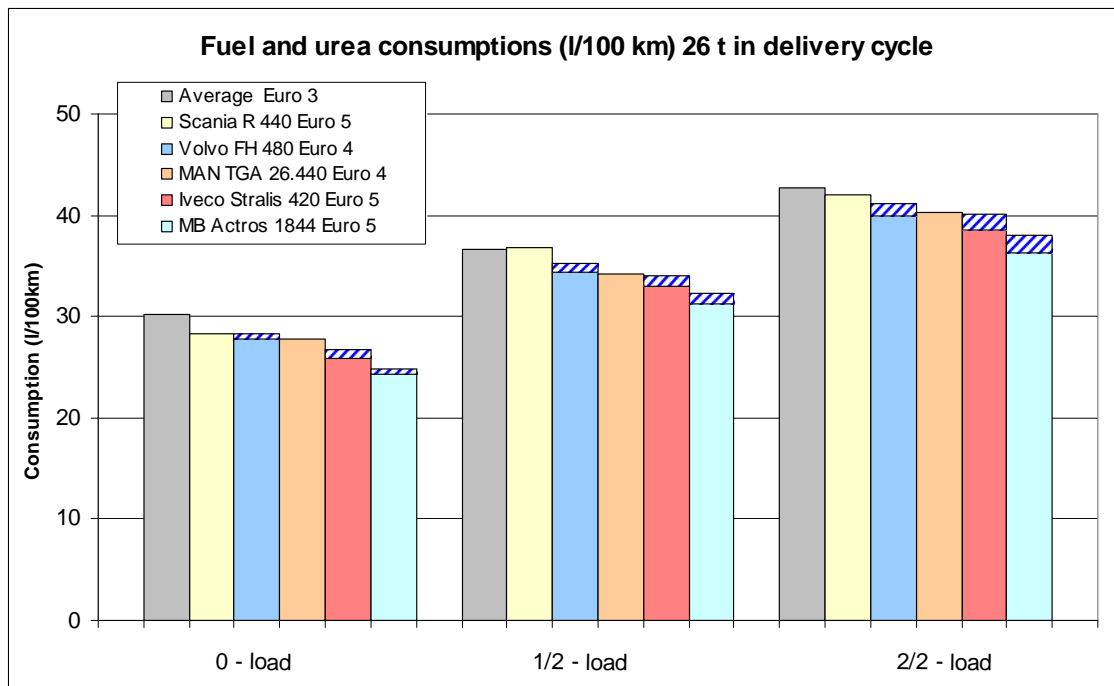
Kuva 2.16. NO_x- ja PM –päästöt vetopyörätyötä kohden, 18 t -maantiesykli.

2.2.4 26–tonnisten autojen vertailumittaukset

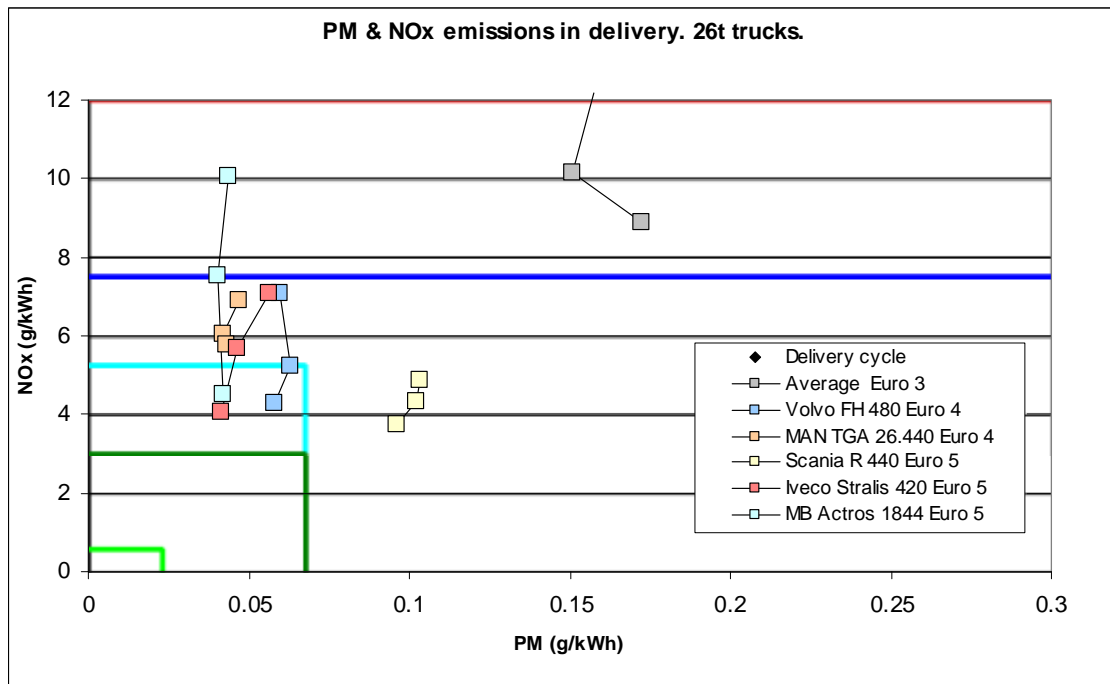
Raskas jakeluautoluokka on mielenkiintoinen vertailusarja, koska siinä yhdistyvät sekä 42 t että 60 t luokissa mitatut ajoneuvot.

Kuvassa 2.17 (kulutusluvut) nähdään melko suuria eroja autojen välillä. Taloudellisimaksi vaihtoehdoksi erottuu joukosta MB Euro V keskimäärin 12 % erolla epätaloudellisimpaan vaihtoehtoon. Vaikka merkkien väliset erot ovat luokan sisällä huomattavan suuria on kaikkien merkkien taloudellisuus parempi kuin Euro III-keskitason.

Haastavassa jakelusyklissä eivät raskaat jakelukuorma-autot pysy päästöjen osalta Euro IV-luokan rajoissa. Sekä 26- että 18-tonnisten luokassa EGR-autojen NO_x-päästöjen hajonta kuorman vaikutuksesta oli vähäisempää kuin SCR-tekniikalla varustettujen autojen (kuva 2.18). Kevyemmällä kuormilla SCR-järjestelmän vähäisempi toiminta näkyy NO_x-päästöjen ohella myös pienempänä suhteellisena ureankulutusena



Kuva 2.17. Polttoaineen- ja ureankulutus 26 t, jakelusykli.



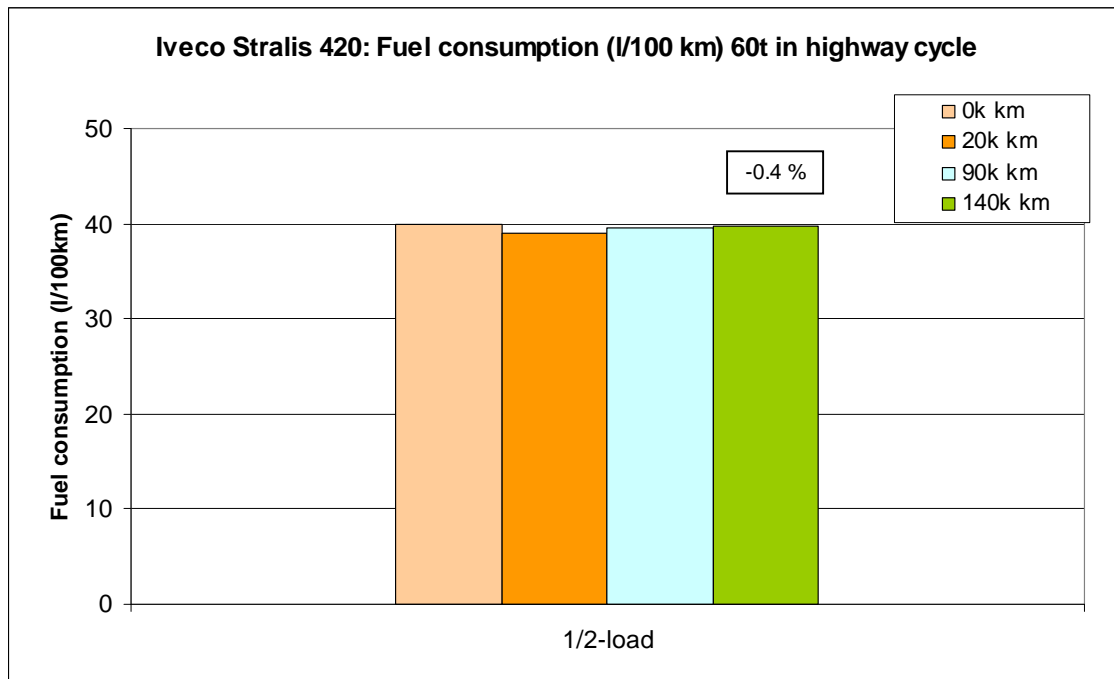
Kuva 2.18. NO_x- ja PM -päästöt vetopyörätyötä kohden, 26 t -jakelusykli.

2.2.5 Seurantamittaukset

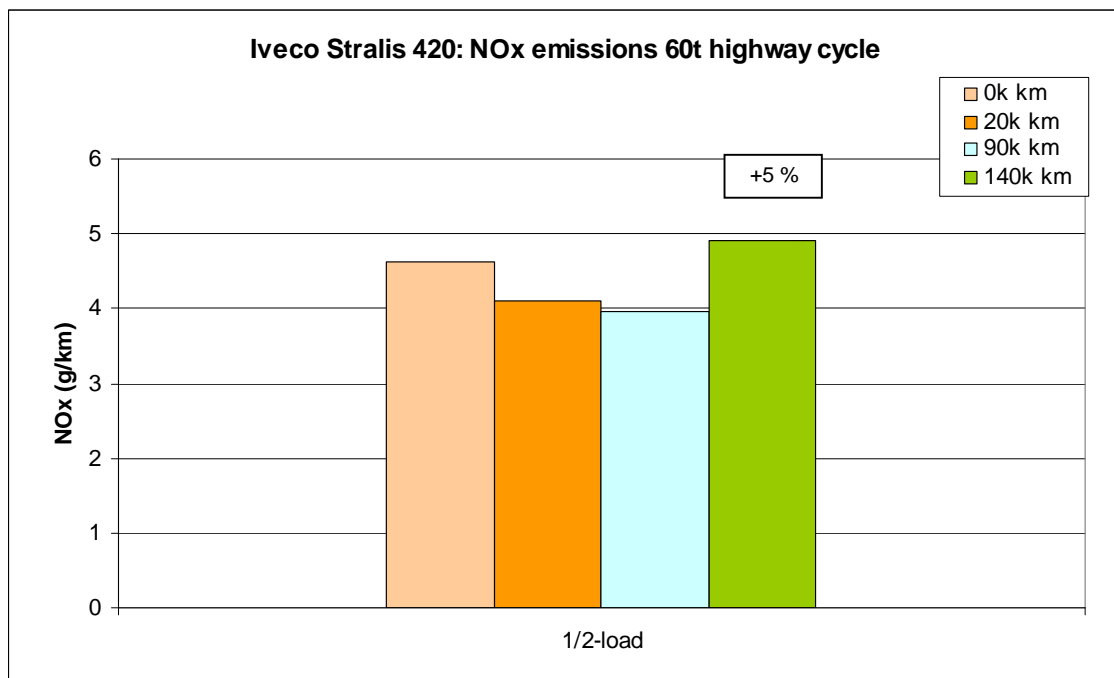
RASTU-projektin aikana on seurattu kahta 60-tonnista vetoautoa, Iveco Stralis 420 Euro IV SCR ja Scania R420 Euro IV EGR. Mittauksia pyrittiin alusta suorittamaan harvintuvin kilometrikertymävälein, mutta autoihin tehtyjen muutosten takia mittausvälejä on tarpeen mukaan tihennetty.

Vuonna 2008 Iveco kävi mittauksissa kaksi kertaa, 90 000 km ja 140 000 km kohdalla. Kulutuksen osalta ajoneuvon voidaan katsoa pysyneen muuttumattomana koko seurantaajan (kuva 2.19).

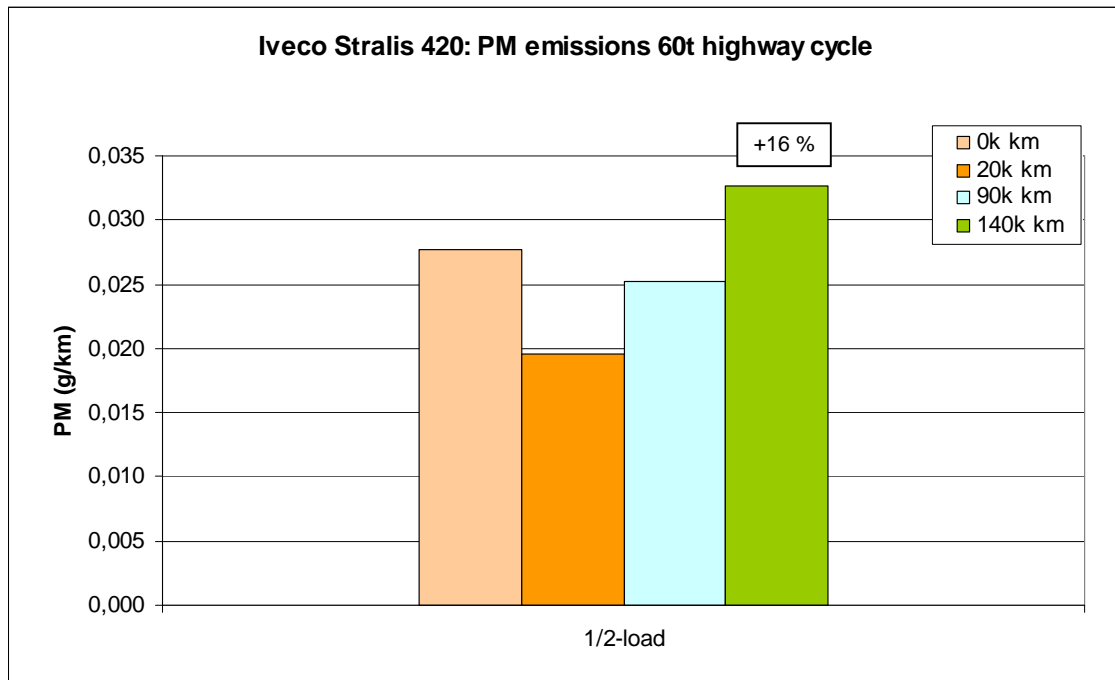
Päästöt Ivecossa ovat vaihdelleet voimakkaasti. NO_x-päästöt ovat kilometrikertymän mukana ensin vähentyneet (-18 %), mutta viimeisimmässä mittauksissa nousseet lähtötasoa korkeammaksi (+5 %). PM-päästöt ovat myös nousussa. Alhaisimmillaan PM päästö on ollut jopa -35 % alkuperäisestä. Viimeinen mittaus osoitti kuitenkin selvää kasvua (+16 %) myös PM-päästöissä. On kuitenkin liian aikaista väittää päästöillä olevan nousevaa trendiä. Muutokset päästötasoissa voivat edelleen olla ajoneuvolle ominaista vaihtelua, joskin vaihteluiden voidaan sanoa olevan huomattavan suurina, etenkin partikkelipäästöjen osalta.



Kuva 2.19. Iveco Stralis 420 seuranta, kulutus 60t-maantiesykli. Prosentuaalinen ero viimeisimmästä mittauksesta lähtötilanteeseen



Kuva 2.20. Iveco Stralis 420 seuranta, NOx-päästöt, 60t-maantiesykli.

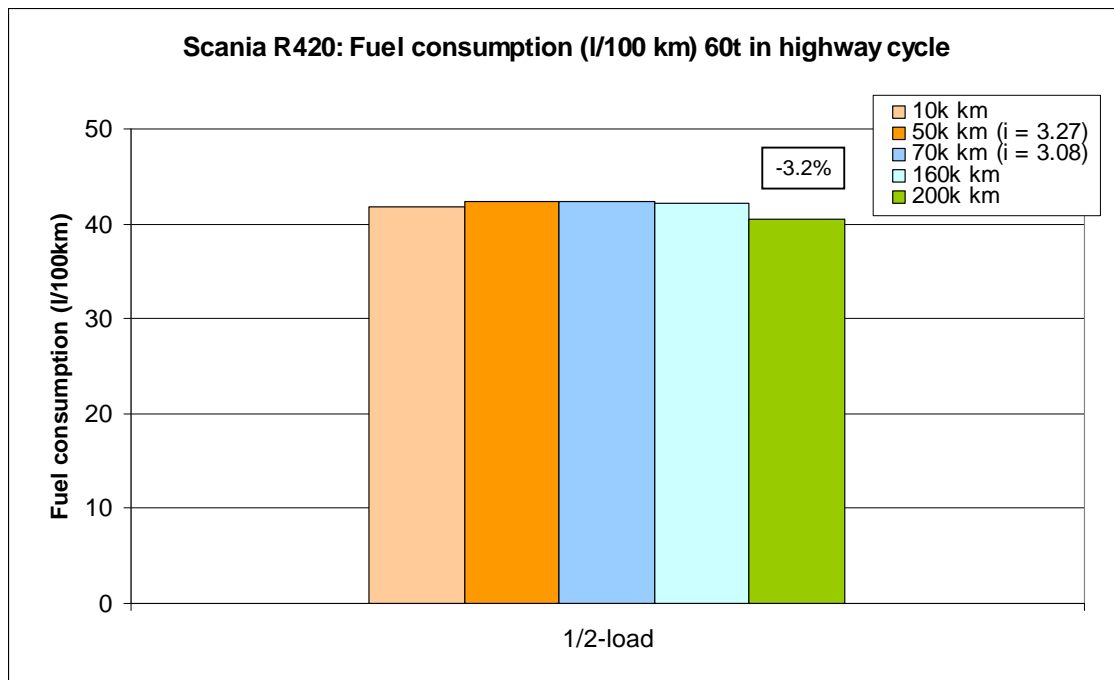


Kuva 2.21. Iveco Stralis seuranta, PM-päästöt, 60t-maantiesykli.

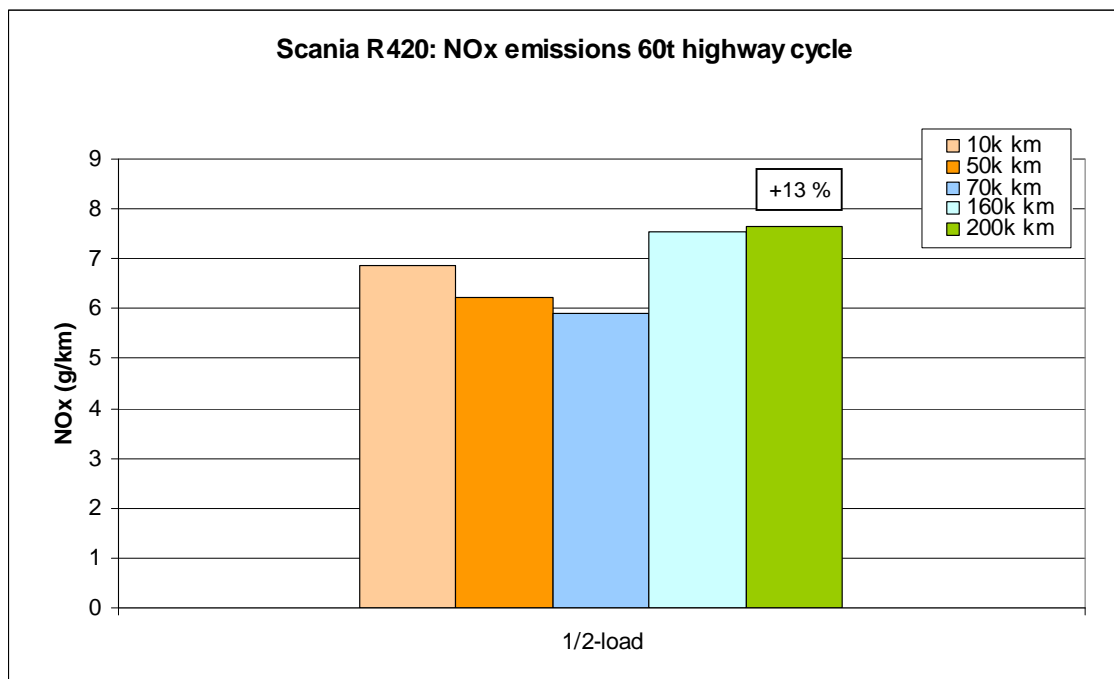
Scania R420 Euro IV-ajoneuvoa on mitattu vuonna 2008 peräti 4 kertaa. Seurantamittaukset tehtiin 50 000, 160 000 ja 200 000 kilomerin kohdalla. Lisäksi ajoneuvo on mitattu perävälityksen vaihdon takia 70 000 km kohdalla.

Kulutus on Scaniassa pysynyt hyvin tasaisena viimeisimpään mittaukseen asti, jossa voidaan havaita poikkeavan suuri lasku (-3,2 %). Ero on niin suuri, että kulutuksessa todetaan tapahtuneen selvä muutos (kuva 2.22). Kaikki mittaukset on tehty käyttäen vetävillä pyörillä VTT:n mittarenkaita, jolloin esim. renkaiden kulumisaste ei vaikuta tulokseen.

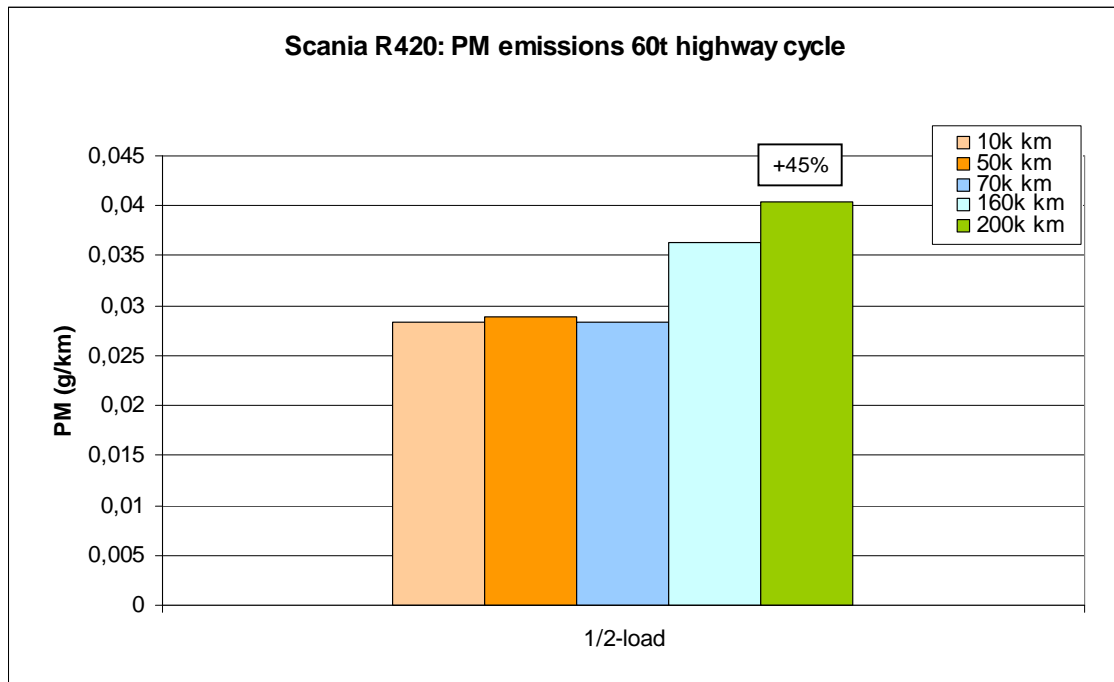
Scanian NO_x-päästöt näyttävät vaihtelevan samalla tavalla kuin Ivecon tapauksessakin, eikä selkeää trendiä ole mahdollista määrittää, vaikka viimeksi mitattu päästötaso olikin merkittävästi lähtötasoa suurempi (+13 %). PM-päästö sen sijaan on kasvanut kahdessa viimeisimmässä mittauksessa, jopa +45 % lähtötasoon nähden. (kuvat 2.23 ja 2.24)



Kuva 2.22. Scania R420 seuranta, polttoaineen kulutus, 60t autot, maantiesykli.



Kuva 2.23. Scania R420 seuranta, NOx-päästöt, 60t autot, maantiesykli.



Kuva 2.24. Scania R420 seuranta, PM-päästöt, 60t autot, maantiesykli.

2.2.6 Yhteenveto

Jakson 2006 – 2008 mittauksista voidaan päätellä että uusimmat Euro IV ja Euro V – kuorma-autot ovat päästörajoitusten perusteella oletetun puhtaita myös todellisissa ajotapahtumissa. Kuorma-autojen ajosuoritteet ovat moottorin kuormitusmuutosten kannalta huomattavasti rauhallisempia kuin esim. kaupunkibussien tapauksessa. Moottorien transienttinen hyväksyntätesti ETC on lisäksi alkujaan kehitetty kuorma-autojen kuormitusprofiileihin perustuen, mikä myös osaltaan selittää miksi kuorma-autojen todellisissa ajosykleissä päästöt ovat kaupunkibusseja paremmin hallinnassa.

Kuten kaupunkibusseissa, myös kuorma-autoissa uudet moottorityypit ovat tiukentuneista päästömääräyksistä huolimatta entistä taloudellisempia. Toisaalta tähän on vaikuttanut SCR-järjestelmien mahdollistama moottorien säätöjen optimointi energiatehokkuuden suhteen, ja toisaalta uusien moottorityyppien markkinoilletulo.

Kaikissa autoluokissa energiatehokkain ja myös mahdollinen urea-kustannus huomioiden myös taloudellisin vaihtoehto oli SCR-järjestelmällä varustettu auto. Pelkkä SCR-järjestelmä ei kuitenkaan vielä ole taloudellisuuden tae, sillä sekä 18- että 42-tonnisissa toiseksi taloudellisimmaksi vaihtoehdoksi nousi EGR-auto.

3 EURO IV/V/EEV –AUTOJEN POLTTO- JA VOITELU-AINEET

Vastuutaho: VTT

Teksti: Matti Kytö

3.1 YLEISTÄ

Vuosina 2006 – 2008 mittausohjelmaan on kuulunut polttoainekokeita uusiutuvalla vetykäsittelytekniikalla tuotetulla NExBTL-dieselillä, perinteisellä RME biodieselillä ja ruotsalaisella vähäpäästöisellä MK1 (Miljö Klass 1) polttoaineella. Voiteluaineiden vaikutusta on tutkittu sekä Cummins dieselmoottorilla moottorijarrudynamometrissa että kokonaisessa ajoneuvossa alustadynamometrillä. Myös automaattivaihteistoöljyjen vaikutusta polttoaineenkulutusta tutkittiin ajoneuvomittauksilla, mutta suhteellisen suppeasti.

Vuonna 2008 tehtiin vain edellisiä mittasarjoja täydentäviä voiteluainekokeita, jotka raportoidaan kohdassa 3.3. Aikaisempina vuosina tehtyjen polttoainekokeiden keskeiset asiat kerrotaan lyhyesti kohdassa 3.2.

3.2 POLTTOAINEKOKKEET

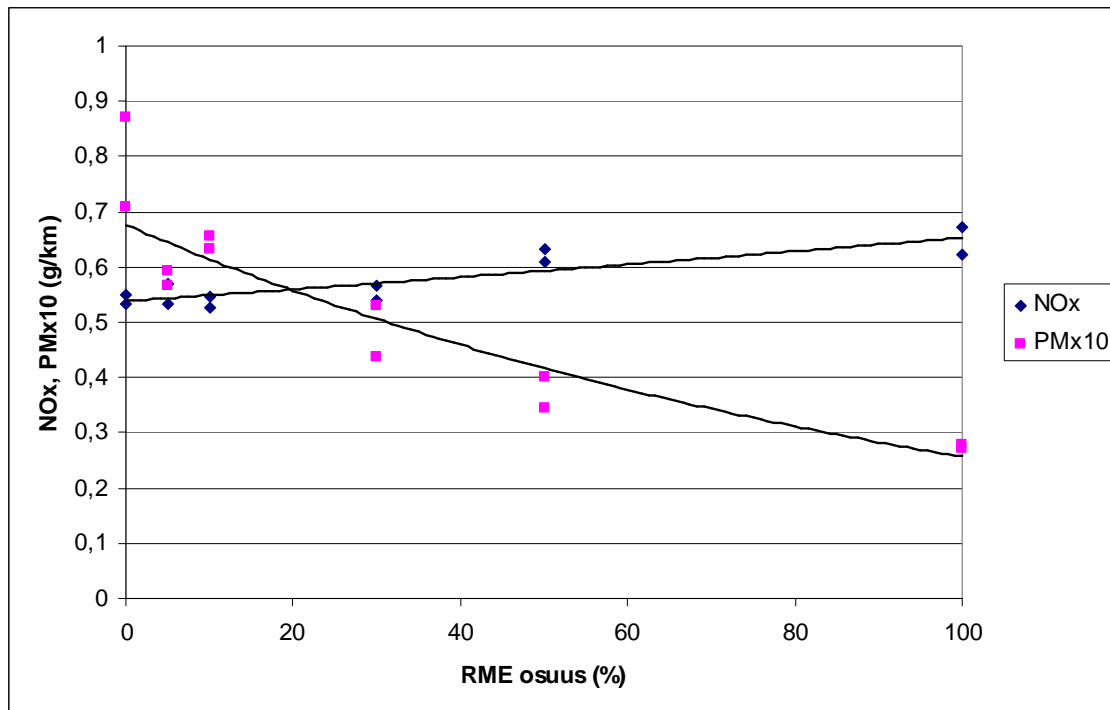
Polttoainekokeita tehtiin vuonna 2007 postinjakelussa käytettävillä autoilla ja pääosin myös näiden auton ajoa kuvaavilla sykleillä. Polttoaineet olivat kauppalatuinen diesel-polttoaine, rypsiöljyn metyyliesteri (RME) sekä Neste Oil Oyj:n valmistama vetykäsittely uusiutuva dieselpolttoaine NExBTL. Kokeet on raportoitu yksityiskohtaisesti vuoden 2007 vuosiraportissa, ja tässä kerrataan vain keskeiset asiat. Vastaavasti vuonna 2006 tehtyjen linja-autokokeiden (NExBTL vs. suomalainen kaupallinen diesel) ja kuorma-autokokeiden mittauksista (ruotsalainen vähäpäästöinen MK1 dieselpolttoaine vs. suomalainen kaupallinen diesel) keskeiset tulokset raportoidaan tässä.

3.2.1 Kevyen jakelukaluston kokeet

Kokeet tehtiin vuosimallin 2004 Volkswagen Transporter 1.9 TDI-7HK-Kasten-pakettiautolla postinjakelua kuvaavalla sykllillä.

Kokeissa mitattiin säännellyt pakokaasupäästöt (häkä, kokonaishiilivedyt, typen oksidit, partikkelimassa ja hiilidioksidi) sekä polttoaineenkulutus. Polttoaineenkulutus mitattiin vaa'lla kokeen aikana kulutettuna massana, joka muutettiin laskennallisesti l/100 km kulutukseksi.

Dieselpolttoaineeseen verrattuna RME alensi hiukkaspäästöä merkittävästi ja lisäsi typen oksidien päästöjä. Tulos on hyvin tyypillinen. Muissakin tutkimuksissa vastaavilla polttoaineilla NO_x -päästö on kasvanut jonkin verran ja hiukkaspäästö alentunut merkittävästi. Muutosprosentit vaihtelevat jonkin verran eri moottoreilla. Nyt puhtaalla RME:llä hiukkaspäästö laski 65–75 % verrattuna dieselpolttoaineella mitattuun päästöön, NO_x -päästö vastaavasti kohosi 12–20 %. Typenoksidien ja hiukkaspäästöjen muutokset olivat melko lineaarisia, joskin väliltä RME 50–100 % ei ole mittauksia.



Kuva 3.1. NO_x ja hiukkaspäästö (hiukkaspäästö $\times 10$) eri polttoaineseoksilla postin jakeluajoa kuvaavalla syklillä.

Puhtaalla RME:llä volymetrinen polttoainenkulutus kohosi 8–11 % vastaavista dieselpolttoaineella mitatuista arvoista. Kasvu on suurempi kuin mitä polttoaineiden lämpöarvoero antaisi aiheen olettaa (dieselpolttoaine tyypillisesti 36 MJ/l, RME 34 MJ/l, ts. ero n. 6 %).

3.2.2 Raskas jakelukalusto

Raskaan ajoneuvokaluston mittaukset tehtiin keskiraskaalla EGR-tekniikalla varustetulla vuosimallin 2004 MAN Euro III-kuorma-autolla, joka edustaa Postin aluejakelussa käyttämää kuorma-autotyyppiä. Koesyklinä käytettiin VTT:n kehittämää jakelusyклиä, joka kuvaa tyypillistä aluejakeluajoa esikaupunkialueella.

Koepolttoaineet olivat kesäläatuinen dieselpolttoaine, NExBTL biopolttoaine ja RME sekä dieselpolttoaineen ja RME:n seokset, jotka sisälsivät 5 %, 30 % ja 50 % RME:tä. Kokeet ajettiin VTT:n raskaan kaluston alustadynamometrillä. Tulokset kuorma-autolla

olivat dieselpolttoaineen ja RME:n suhteen pitkälti samansuuntaisia kuin pakettiautollakin. Dieselpolttoaineeseen verrattuna RME alensi hiukkaspäästöä merkittävästi, mutta lisäsi typen oksidien päästöjä. Puhtaalla RME:llä hiukkaspäästö verrattuna dieselpolttoaineella mitattuun päästöön laski 65 %, NO_x -päästö vastaavasti kohosi 21 %. Nytkin muutokset RME-osuuden kasvaessa ovat melko lineaarisia. Tulosten hajonta oli erittäin pieni.

NExBTL oli hiukkaspäästöjen suhteen dieselpolttoaineen ja RME:n 50/50 seoksen kaltainen (-30 %), mutta NO_x -päästöt olivat lähes 10 % alhaisemmat verrattuna tavanomaisen dieselpolttoaineen päästöihin, ja noin 25 % alhaisemmat verrattuna puhtaan RME:n NO_x -päästöihin.

Volymetrinen polttoaineenkulutus puhtaalla RME:llä kohosi noin 9 % tavanomaisen dieselpolttoaineen kulutuksesta, NExBTL:lla vastaava lisäys oli noin 4 %. NExBTL:n tiheys on tavanomaisen dieselpolttoaineen tiheyttä pienempi, ja kulutuksen kohoaminen tilavuutena johtuu tästä.

3.2.3 Kokeet linja-autoilla (NExBTL) ja kuorma-autoilla (MK1)

Vuonna 2006 tehtiin vertailumittauksia tavanomaisella dieselpolttoaineella, NExBTL-polttoaineella ja ruotsalaisella MK1-polttoaineella. NExBTL-mittaukset rajoittuivat kahden Euro IV-tasoisin bussin mittaamiseen. Ruotsin Vägverketin toiveesta ajettiin ruotsalainen MK1-dieselpolttoaine (Miljöklass 1, vähäpäästöinen dieselpolttoaine) kahdessa raskaassa kuorma-autossa.

100 %:n NExBTL biopolttoainemittaukset tehtiin Euro IV-sertifioidulla Scanian 9-litraisella EGR-autolla ja Volvon 7-litraisessa SCR-autolla. Vertailupolttoaineena käytettiin kesälaatuista kaupallista dieselpolttoainetta. Molempien autojen kohdalla NExBTL-polttoaine vähensi NO_x -päästöä lähes 10 %. Vaikutus hiukkaspäästöön oli merkittävämpi. SCR-Volvon tapauksessa hiukkaset vähenivät 30 % ja EGR-Scanian tapauksessa peräti 46 %. Polttoaineenkulutus litroina kasvoi luokkaa 5 %, mikä on seurausta NExBTL:n normaalia dieselpolttoainetta pienemmästä tiheydestä.

Vertailu ruotsalaisen MK1-polttoaineen ja suomalaisen dieselpolttoaineen välillä tehtiin kahdella 60-tonnistella kuorma-autoyhdistelmällä, joiden merkit olivat MAN and Mercedes-Benz. Molemmissa autoissa MK1-polttoaine alensi hiukkaspäästöjä, Mercedes-Benzissä 15 – 20 % ja MAN:issä peräti 40 %. Toisaalta EGR-tekniikalla varustetussa MAN-autossa MK1-polttoaine jopa lisäsi NO_x -päästöjä. SCR-järjestelmällä varustetussa Mercedes-Benzissä MK1 sen sijaan alensi NO_x -päästöjä luokkaa 25 %. MK1:n vaikutus polttoaineen kulutukseen oli odotettu, ts. ei muutosta massapohjaisessa polttoaineen kulutuksessa ja pieni nousu litramääräisessä polttoaineen kulutuksessa johtuen MK1:n normaalia dieselpolttoainetta pienemmästä tiheydestä.

3.3 VOITELUAINEKOKEET

Tutkimusta moottoriöljyn laadun vaikutuksesta Cummins ISBe4 160B (Euro IV) -moottorin polttoaineenkulutukseen jatkettiin vuonna 2008 vanhennetuilla öljyillä. Vuoden

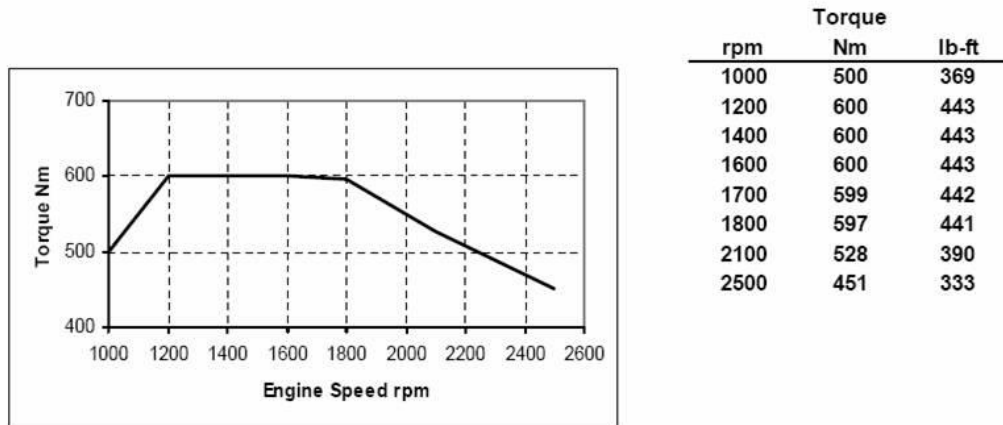
2006 RASTU -vuosiraportissa raportoitiin referenssiöljy mukaan lukien 14 uudella öljyllä tehtyjen kokeiden tulokset. Suurimmillaan kahden öljyn väliseksi eroksi saatiin noin 1,2 %, yksittäisessä kuormapisteessä ero oli suurimmillaan noin 1,5 %. Vuoden 2008 koesarjassa mitattiin polttoaineenkulutusta kolmella linja-autossa vanhennetulla öljyllä. Vanhenuksessa käytetyt ajoneuvot olivat normaalissa liikenteessä. Kutakin öljyä vanhennettiin kahdessa Oy Pohjolan Henkilöliikenne Ab:n linja-autossa, joista toinen oli kaupunkiliikenteessä ja toinen vakioliikenteessä. Ajoneuvoparit valittiin siten, että kaikkien öljyjen vanhennus tapahtui mahdollisimman tasapuolisesti. Kaupunkiliikenteessä öljyä vanhennettiin noin 32 000 km, vakioliikenteessä keskimäärin lähes 50 000 km. Moottorikokeet tehtiin yhdistetyillä öljynäytteillä, ts. kaupunki- ja vakioliikenteen busseista otetut samanmerkkiset öljyt yhdistettiin yhdeksi näytteeksi. Moottorikokeisiin tulleiden käytettyjen öljyjen perustiedot ovat taulukossa 3.1. Yhden öljyn viskositeetti oli laskenut hieman alle kyseisen luokituksen alarajan.

Taulukko 3.1. Kokeissa käytetyt öljyt

öljy	viskositeettiluokka	vanhennetun näytteen viskositeetti 100 °C:ssa, cSt	keskimääräinen ajomatka, km
Neste Turbo LXE	10W-40	12,19	39770
Castrol Elixion LowSAPS	5W-30	10,76	43900
Shell Rimula Ultra (E7)	10W-40	13.45	37960

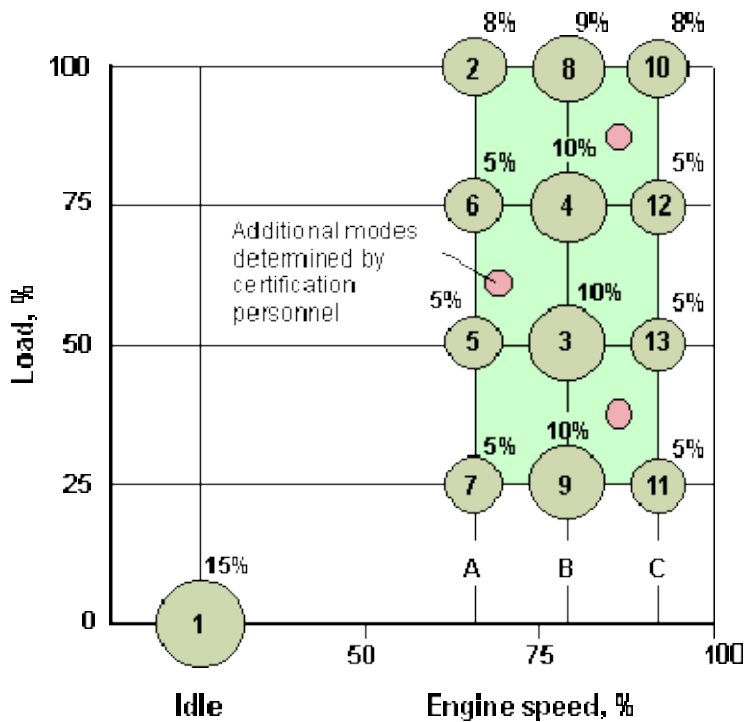
Mittauksissa käytetty Cummins on 4.5 litran EURO IV päästötason SCR tekniikalla varustettu moottori, jonka maksimiteho 118 kW. Moottorin tekniset tiedot on esitetty kuvassa 3.2.

Engine Model: ISBe4 160B	CPL: 8781
Advertised Power: 118kW @ 2500rpm 158BHP @ 2500rpm	Peak Torque: 600Nm @ 1500rpm 443lbft @ 1500rpm
Displacement: 4.5 Litre	Bore: **mm
Configuration: 4 cylinder in-line	Stroke: **mm
	Aspiration: Turbocharged & Aftercooled
	Fuel System: Bosch HPCR



Kuva 3.2 Cummins ISBe4 160B –moottorin tekniset tiedot.

Mittaukset suoritettiin siten, että täysin lämменneellä moottorilla ajettiin 6 eri ESC-kuormasyklin pistettä osakuormia painottaen. Kulutus mitattiin gravimetrisesti ja kuormapisteet olivat A25, B25, C25, B50, B75 ja C75 (kuva 3.3). Kuvaan 3.3 kunkin kuormituspisteen viereen on merkitty päästötulosten laskennassa käytettävä pisteen painoarvo. Tässä kutakin kuormapistettä ajettiin 38 min, jonka aikana tehtiin 8 n. kolmen minuutin pituista kulutusmittausta.

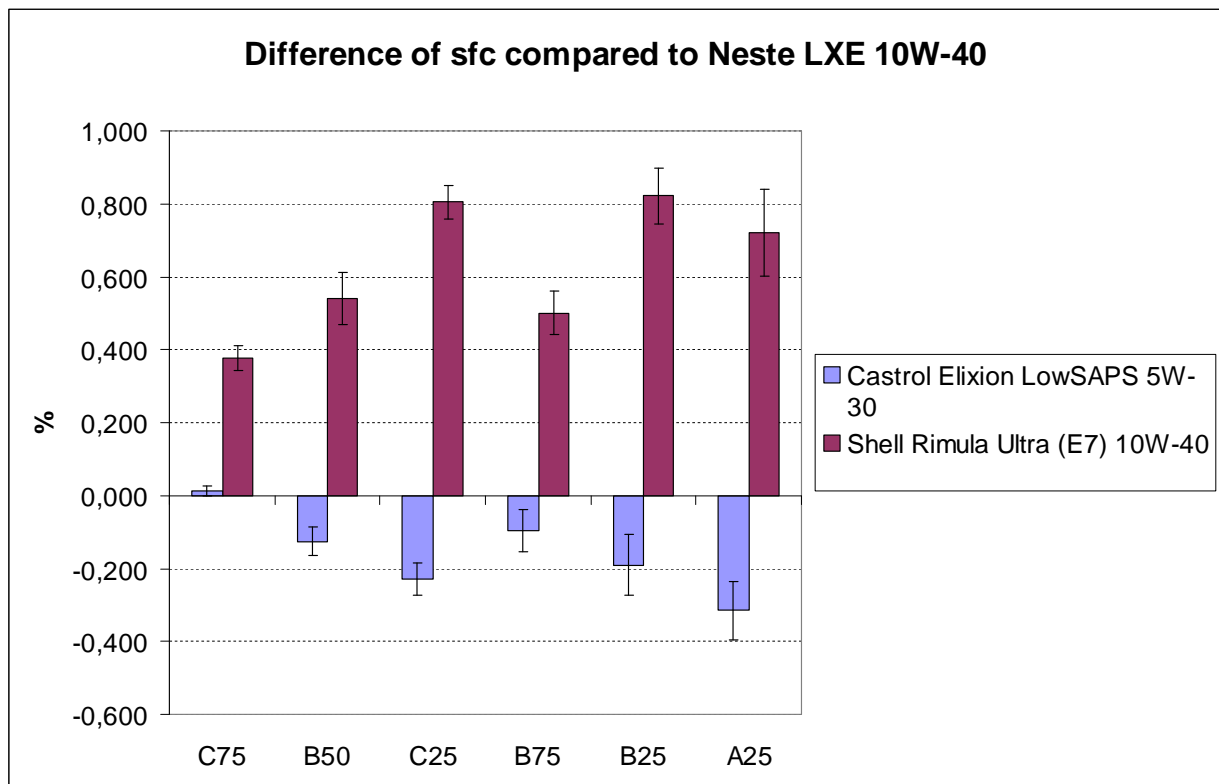


Kuva 3.3. ESC syklin kuormapisteet. Ympyrät eri pisteissä kuvaavat pisteen painoarvoa päästömittauksessa.

Kuvassa 3.4 on esitetty keskiarvo kuormapisteiden ominaiskulutusarvosta eri öljynlaaduille. Referenssiöljyn tulos (Neste LXE 10W-40) on esitetty 0-tasolla. Käytetyillä öljyilläkin ero kahden öljyn välillä oli suurimmillaan noin 1 %, siis samaa tasoa kuin uusilla öljyilläkin. Polttoaineenkulutuksen suhteelliset erot kasvavat kevyemmällä kuormalla kuten kaikissa aiemmin tehdyissä mittauksissakin. Kitkan suhteellinen osuus kasvaa kuorman pienetessä, joten mahdolliset erot voiteluaineiden välillä myös kasvavat.

Polttoainekulutustulokset ovat edellisissä HDenergia- ja RASTU-projektien moottorikokeissa korreloineet kohtuullisen hyvin öljyjen kinemaattisen viskositeetin (@ 100 °C) kanssa. Kolmesta moottorista nimenomaan tässäkin käytetyllä Cummins-moottorilla korrelaatio oli heikoin. Näissäkin kokeissa kulutus oli suurin korkeimman viskositeetin omaavalla öljyllä kaikissa kuormapisteissä, mutta pelkän viskositeetin perusteella ero ohuimman öljyn ja referenssiöljyn välillä olisi pitänyt olla suurempi ja vastaavasti referenssiöljyn ja viskoosimman öljyn välillä pienempi. Öljyn lämpötila oli mittausten aikana välillä 92 °C – 101 °C.

Tulosten perusteella öljyjen vaikutus polttoaineenkulutukseen ei muutu ainakaan merkittävästi öljyn vaihtovälin aikana.



Kuva 3.4 Moottoriöljyn vaikutus dieselmootorin (Cummins ISBe4 160B) polttoaineen kulutukseen eri kuormapisteissä. Polttoaineenkulutus käytettäessä Neste LXE 10W-40 öljyä on referenssikulutus, johan kahta muuta öljyä on verrattu.

Vuonna 2007 tehtiin suppea koesarja alustadynamometrillä kokonaisella ajoneuvolla (Kabus ML kaupunkibussilla), jossa oli samanlainen 4.5 litran Cummins moottori kuin moottorikokeissakin. Automittauksia tehtiin kolmella moottoriöljyllä: 10W40 luokan prototyypinöljyllä (kehitysformulaatio 333) sekä kaupallisilla 10W40 ja 15W40 luokan öljyillä. Kokeet tehtiin kaupunkiajoa kuvaavalla Braunschweig syklistä.

Viskositeettiluokan 10W40 kehitysformulaatiolla saatiin alhaisin polttoaineenkulutus, 15W40 luokan öljyllä 1,1 % korkeampi kulutus ja kolmannella öljyllä (10W40) 1,8 % korkeampi tulos kuin kehitysformulaatiolla. Ajoneuvokokeissa virhemarginaali on suurempi kuin moottorikokeissa johtuen suuremmasta määrästä tulokseen vaikuttavista tekijöistä, joista tärkeimmät ovat kuljettaja ja renkaat. Kaupunkiajoa kuvaavassa syklistä moottorin kuormitusaste on keskimäärin pieni ja silloin kitkahäviöiden suhteellinen merkitys kasvaa, ts. mahdollinen öljyn vaikutus polttoaineenkulutukseen kasvaa. Kahden 10W40 luokan öljyn välinen ero oli 1,8 %, joka on jo merkitsevä.

Samalla linja-autolla ja samalla koejärjestelyllä kuin moottoriöljykokeessa tehtiin kokeet auton alkuperäisellä automaattivaihteistoöljyllä ja Neste ATF-X öljyllä. ATF-X öljyllä polttoaineenkulutus aleni kahden kokeen keskiarvoista laskettuna 2,9 %. Alkuperäisellä öljyllä ajettujen kokeiden tulosten hajonta on valitettavan suuri, mutta eri öljyjen tulosten ero on silti selvä ja todistaa, että automaattiöljyn oikealla valinnallakin voidaan

säästää polttoainetta Automaattivaihteistoöljyjen kohdalla, kuten muidenkin öljyjen kohdalla, on huomioitava ajoneuvon valmistajan öljylle asettamat vaatimukset.

3.4 LIIKENTEEN POLTTOAINEVAIHTOEHDOT –KEHITYS- TILANNERAPORTTI

VTT teki vuonna 2002 MOBILE²-tutkimuskokonaisuuden puitteissa selvityksen eri polttoainevaihtoehtojen päästö- ja käytettävyyssominaisuuksista. Tämä raportti oli pääasiassa taulukkomuodossa. Vuonna 2007 liikenne- ja viestintäministeriö tilasi aiheeseen päivityksen. Raportti ja sen tiivistelmä ovat ladattavissa RASTU:n verkkosivuilta osoitteesta: <http://www.motiva.fi/fi/raskaskalusto/rastu/rasturaportit/polttojavoiteluaineet/>

Vuoden 2002 jälkeen kehitys on mennyt nopeasti eteenpäin varsinkin biopolttoaineiden osalta. Vuonna 2003 EU:ssa annettiin liikenteen biopolttoainedirektiivi, joka asettaa vuoden 2005 käyttötavoitteeksi 2 % ja vuoden 2010 käyttötavoitteeksi 5,75 % biopolttoaineita energiana laskien. Niinpä esim. biopolttoaineiden tuotanto Euroopassa viisinkertaistui vuodesta 2002 vuoteen 2006.

Päästö- ja käytettävyyssominaisuuksien lisäksi raportissa on käsitelty myös liikenteen ympäristöhaasteita yleisellä tasolla, maailman liikennepolttoaineiden tuotantoa ja käyttöä sekä vaihtoehtoisten polttoaineiden edistämistoimia. Vaihtoehtoisten polttoaineiden osuus vuonna 2007 oli maailman tasolla yhteensä noin 3,5 %, ja biopolttoaineiden osuus noin 1,5 %.

4 AJONEUVOTEKNINEN KEHITYSTYÖ

Vastuutahot: TKK ja VTT

Teksti: Henri Ritola, Mikko Lehessaari & Osku Kaijalainen (TKK), Tommi Hangasmaa & Petri Laine (VTT)

4.1 YLEISTÄ

Ajoneuvotekniikan kehitystyöhön kohdistuvia osatehtävistä useimmat ovat kohdistuneet vain yhteen vuoteen ja painopiste on ollut vuosilla 2006 ja 2007. Aiemmin raportoiduista aerodynamiikasta, perävaunujen turvatekniikasta, raskaiden ajoneuvojen massaselvityksestä, kevytrakennetekniikasta, rengasmittauksista, moduuliyhdistelmän stabiiliteetista sekä 42/60-tonnisten yhdistelmien energiatehokkuusvertailusta raportoidaan tässä vain keskeiset tulokset. Vuonna 2008 tehty akseliston suuntaus tehtävä raportoidaan yksityiskohtaisemmin.

4.2 KEVYTRAKENNETEKNIikka (TKK)

Vuonna 2007 valmistuneessa Ritolan diplomityössä perehdyttiin perävaunujen rakenteeseen, materiaaleihin ja päällirakenteisiin tarkoituksena muodostaa kokonaiskuva perävaunun omamassan rakentumisesta ja edelleen löytää keinoja keventää perävaunun omamassaa. Tarkastelussa keskityttiin kappaletavarakuljetuksiin tarkoitettuihin perävaunuihin.

Perävaunujen omamassa koostuu eri komponenteista, joista suurimmat vaikuttajat kokonaisuudessaan ovat runko, päällirakenne, akselit, renkaat, jarrujärjestelmä ja erilaiset koneet. Taulukossa 4.1 on yksi esimerkki puoli- ja täysperävaunun eri komponenttien osuuksista. Alustan massaan kuuluvat runko, akselit/jousitus, renkaat, lisävarustus ja muuta.

Taulukko 4.1. Eri komponenttien osuudet puoli- ja täysperävaunujen omamassoista.

Komponentti	Puoliperävaunu (42 t)	Täysperävaunu 5-aks. (42 t)
Omamassa (kg)	9000 (10000)	10600
Alusta (kg)	5250	8400
<i>Runko (kg)</i>	2900	4300
<i>Akselit/jousitus (kg)</i>	1500	2500
<i>Renkaat (kg)</i>	700	1150
<i>Lisävarustus (kg)</i>	50	300
<i>Muuta (kg)</i>	100	150
Päällirakenne (kg)	3750	2200
Kylmäkone (kg)	(1000)	-

Yleisin tapa pudottaa painoa perävaunuissa on vaihtaa materiaali perinteisestä teräksestä ja raudasta alumiiniin, suurlujuusteräkseen, erilaisiin metalliseoksiin tai komposiitteihin. Tällä toimenpiteellä saadaan runkoa ja päällirakenteita kevennettyä huomattavasti. Päällirakenteiden paneeleissa kevennykseen voidaan käyttää lasi- tai hiilikuitua. Suurin osa perävaunun massasta koostuu kuitenkin akselistoista, jarruista, jousituksesta ja renkaiden. on kuitenkin keskittynyt päällirakenteisiin ja runkoihin. Valmistajilta löytyy kyllä erilaisia keveitä versioita em. komponenteista, mutta niitä ei vielä ole kovin laajassa käytössä verrattuna päällirakenteiden vastaaviin. Rengastuksen vaihdolla esim. pienempään halkaisijaan tai ns. supersingleen saadaan useita satoja kilogrammoja pois perävaunun omamassasta. TKK:n simulointien mukaan 1000 kg pudotus kokonaisuudessaan merkitsee runsaan prosentin polttoaineenkulutuksen alenemista.

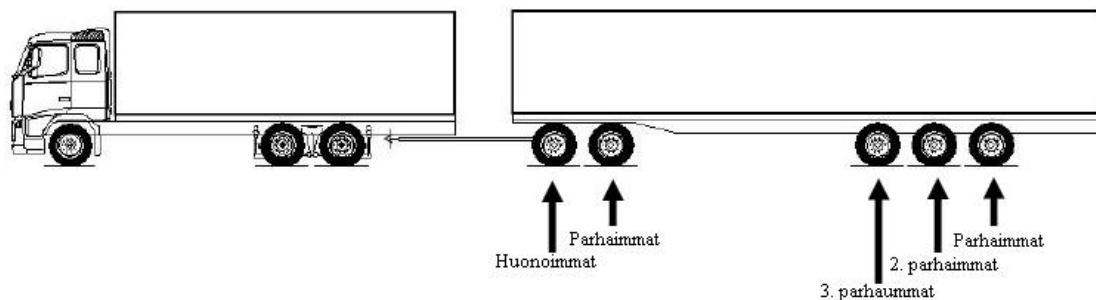
4.3 MODUULIYHDISTELMIEN STABILITEETTI JA RENKAIDEN VAIKUTUS (TKK)

Moduuliyhdistelmän stabiliteetti –osus perustuu Lehessaaren TKK:lla vuonna 2007 tekemään diplomityöhön.

Moduuliyhdistelmällä tarkoitetaan ajoneuvoyhdistelmää, jonka pituus on yli 22 metriä ja kokonaismassa 60 tonnia. Maksimi pituus on 25,25 metriä. Moduuliyhdistelmiä voidaan muodostaa neljällä tavalla; vetoauton ja varsinaisen perävaunun yhdistelmä, vetoauton, apuvaunun ja puoliperävaunun yhdistelmä, vetoauton, puoliperävaunun ja keskiakseliperävaunun yhdistelmä tai vetoauton, puoliperävaunun ja toisen puoliperävaunun yhdistelmä, ns. b-juna. Moduuliyhdistelmä ja etenkin kuorma-auton ja varsinaisen perävaunun tai vetoauton, apuvaunun ja puoliperävaunun yhdistelmä on ongelmallinen stabiiliuden suhteen. Tämän tyyppiset yhdistelmät ovat kuitenkin yleistymässä Euroopassa.

Renkailla on erittäin suuri vaikutus ajoneuvojen ja ajoneuvoyhdistelmien käyttäytymiseen. Henkilöautoille suosituksena on, että aina paremmat renkaat tulisi laittaa taakse ja tämä sama suositus näyttää diplomityön tulosten perusteella pätevän myös ajoneuvoyhdistelmille siten, että jokaisen ajoneuvoyksikön taka-akselille tulisi laittaa hyvät renkaat.

Täysperävaunun 2. ja 5. akseleilla olisi koko ajan pidettävä mahdollisimman hyviä renkaita. Yleisesti renkaat on hyvä poistaa viimeistään, kun urasyvyys on 3 mm. Suositeltava turvallisuusminimi on talvella 5 mm, ja perävaunun 2. ja 5. akseleilla olisi pidettävä tätä paremmat renkaat.



Kuva 4.1. Perävaunun rengastussuositus.

4.4 42/60-TONNISTEN AJONEUVOYHDISTELMIEN ENERGIA-TEHOKKUUSVERTAILU (VTT)

Vertailun tarkoituksena on selvittää 42 tonnin ja 60 tonnin ajoneuvoyhdistelmien energiankulutuksen erot, eli ottaa kantaa siihen, kumpi yhdistelmä kuljettaa kuormansa energiatehokkaammin. Tässä tehtävässä, joka toteutetaan kahden ajoneuvoyhdistelmän keskinäisenä vertailuna, ei ole tarkoitus ottaa kantaa yhdistelmien kokonaistehokkuuteen tai kannattavuuteen. Kannattavuus riippuu monista tekijöistä (palkat, tarvittavien autojen määrä jne.) ja yhdistelmien valinnassa painavat monet muutkin tarpeet sekä myös lainsäädäntö. Maksimipainoltaan 60 t täysperävaunuyhdistelmät ovat sallittuja lähinnä Suomessa ja Ruotsissa, esim. Keski-Euroopan teille niillä ei ole asiaa. Tämän mittauksen tuloksista ovat kiinnostuneita myös Ranskan energiaviranomainen ADEME ja Ruotsin Vägverket.

4.4.1 Ajoneuvojen valinta

Autojen valinnassa päädyttiin kappaletavarayhdistelmiin niiden yleisyyden, saatavuuden ja mittausten kannalta vertailukelpoisen muodon takia. Tavoitteena oli saada 4,2 metriä korkea kuormatila, koska yleisimmät 60 t yhdistelmien vetoautot ovat tätä korkeusluokkaa. Autojen tuli olla nykyaikaista mallia varustettuina hytin ilmanohjaimilla. 60 t yhdistelmässä päädyttiin moduuliyhdistelmän käyttöön. Tällöin samaa perävaunua voi käyttää molempien yhdistelmien kanssa ja välttyä erilaisten perävaunujen aiheuttamista eroista tuloksissa. Autoissa tuli olla manuaali- tai robottivaihteisto ilman napavälityksiä. Automaattivaihteisto ja/tai napavälitykset ovat sekä harvinaisempia että lisäävät vastusvoimia ja täten kulutusta. Moottoritehojen suhteen päädyttiin siihen, että 60 t vetoauton tulisi olla hieman tehokkaampi kuin 42 t vetoauton, joten vertailupariksi valittiin Volvo FH 440 42 t yhdistelmän vetoautoksi ja Volvo FH 480 60 t yhdistelmän vetoautoksi. Käytännön toteutuksissa jouduttiin tyytymään muutamiin kompromisseihin, joista tarkemmin itse ajoneuvojen yhteydessä.

42 tonnin yhdistelmä

42 t yhdistelmässä käytetty vetoauto oli n. 300 000 kilometriä ajettu välitelillä varustettu Volvo FH 440 vuodelta 2006. Väliteli aiheuttaa hieman ylimääräistä painoa, mutta auto todettiin mittauksiin soveltuvaksi. Mittauksissa käytetty perävaunu oli PNO Trailerin omistama, irtokatteella varustettu lähes uusi karru. Kärryn tavoitekorkeus oli sama 4,2 metriä kuin 60 t yhdistelmän vetoauton kuormatila, mutta jouduimme tyytymään neljä metriä korkeaan karruyn. 4 m on hyvin yleinen puoliperävaunujen korkeus Suomessa ja maksimikorkeus lähes kaikissa Euroopan maissa.



Kuva 4.2 42 t yhdistelmä, Volvo FH 440 ja puoliperävaunu

60 tonnin yhdistelmä

60 t yhdistelmän vetoauto oli uusi vm. 2007 Volvo FH 480 Närkon valmistamalla 4,2 metriä korkealla kiinteällä kuormatilalla. Perävaunu oli sama puoliperävaunu, joka nyt kytkettiin perään Närkon valmistaman apuvaunun eli ns. dollyn avulla.



Kuva 4.3. 60 t yhdistelmä, Volvo FH 480 sekä puoliperävaunu dollyn avulla kytkettynä

4.4.2 Mittausten toteutus

Autojen kokonaisvastusten selvittämiseksi molemmat yhdistelmät rullattiin maantiellä sekä tyhjänä että suurimpaan sallittuun massaun kuormattuna. Rullaukset tehtiin Valta-tie 3:lla ns. Nurmijärven suoralla, jonka korkeusprofiili on tiedossa. Rullauksista saatavien tietojen avulla autoille laskettiin kokonaisvastusarvot, joiden avulla voitiin laskea vastusarvot alustadynamometrissä suoritettavia kulutuseromittauksia varten. Tämän jälkeen vastaavat autot mitattiin dynamometrissä tarkkojen kulutuserojen selvittämiseksi.

Rullauksissa käytetyt yhdistelmämassat olivat:

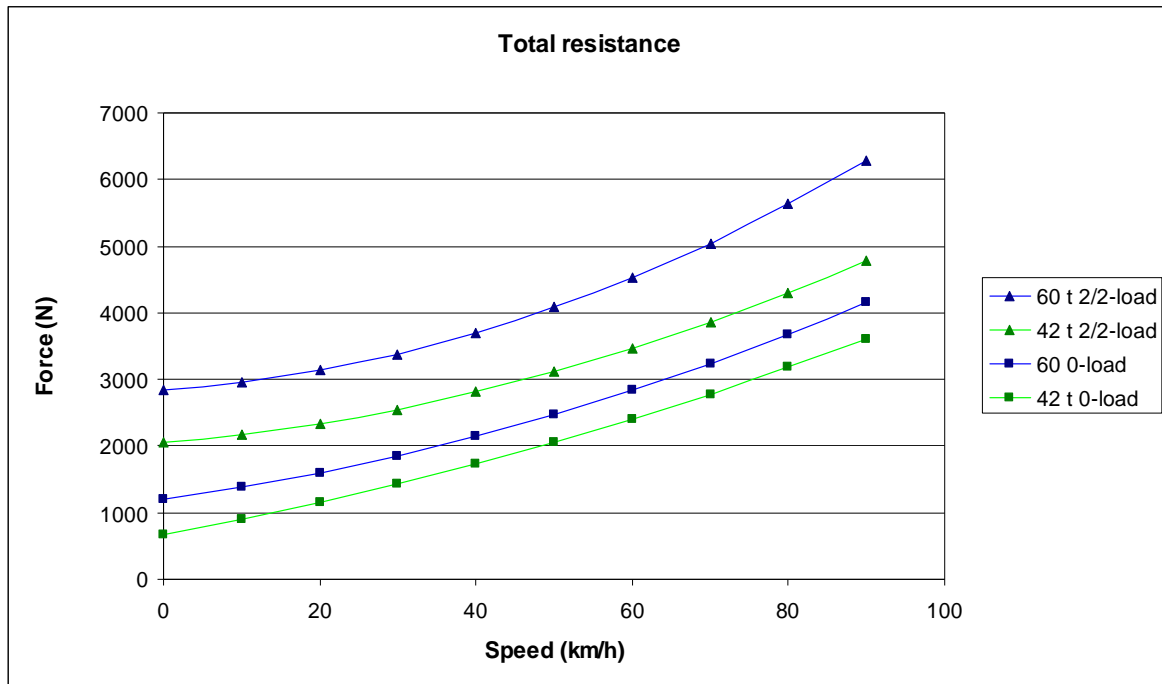
- 42 t yhdistelmä tyhjänä 15 150 kg
- 42 t yhdistelmä täydessä kuormassa 41 515 kg
- 60 t yhdistelmä tyhjänä 21 400 kg
- 60 t yhdistelmä täydessä kuormassa 61 630 kg

Yhdistelmien todelliset massat selvitettiin punnitsemalla Paperinkeräys Oy:n Hakuninmaan asemalla sekä A-Katsastus Oy:n Hakuninmaan katsastuskonttorilla. Kuorma perävaunuun tehtiin Volvo Kaivokselalta lainatuilla betonipainoilla ja kuorma 60 t yhdistelmän vetoautoon tehtiin Työtehoseuran Rajamäen toimipisteestä lainatuilla betonipainoilla.



Kuva 4.4. Volvo FH 480:n kuormaus

Kuvassa 4.5. on maantierullausten perusteella muodostetut kokonaisvastukset, joiden perusteella määritettiin vastusarvot dynamometriä varten. Arvoista voidaan todeta, että 42 t yhdistelmä on pienemmän massansa vuoksi kevyempi rullaamaan kevyempi rullaamaan. Kokonaisvastusten määrittämisen jälkeen varsinaiset kulutuserot selvitettiin VTT:n raskaan kaluston alustadynamometrin avulla.



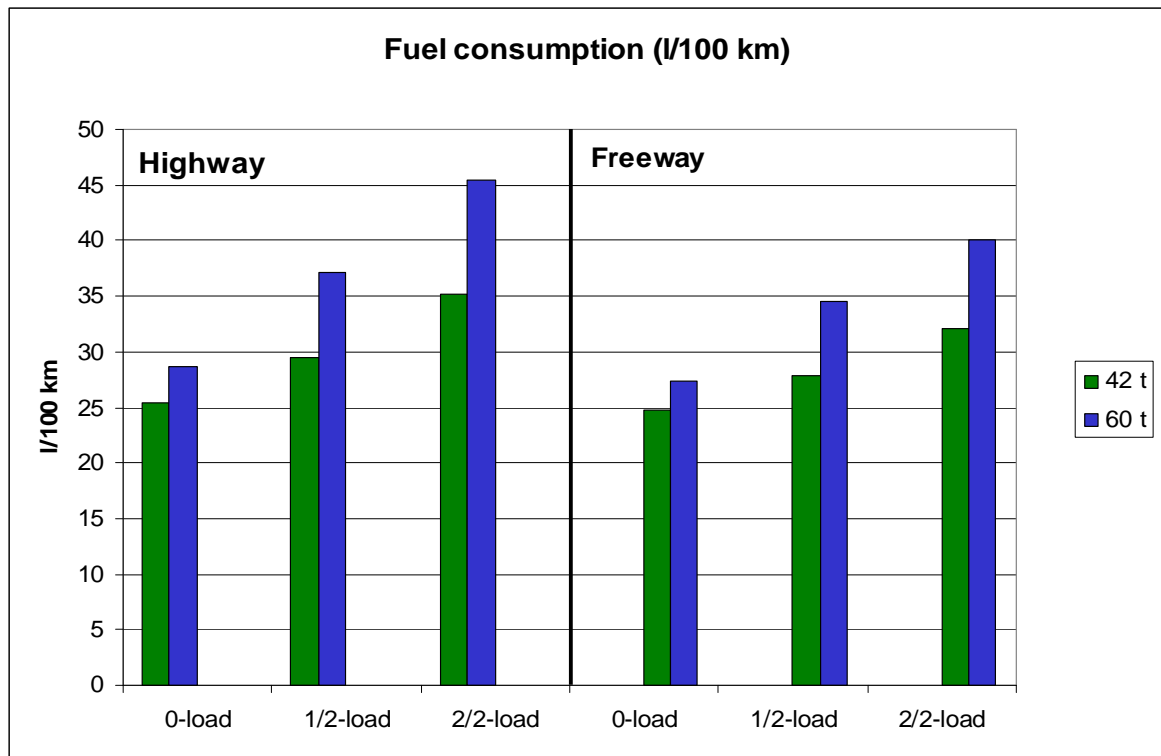
Kuva 4.5. Maantierullausten perusteella muodostetut kokonaisvastukset

4.4.3 Alustadynamometrimittaukset

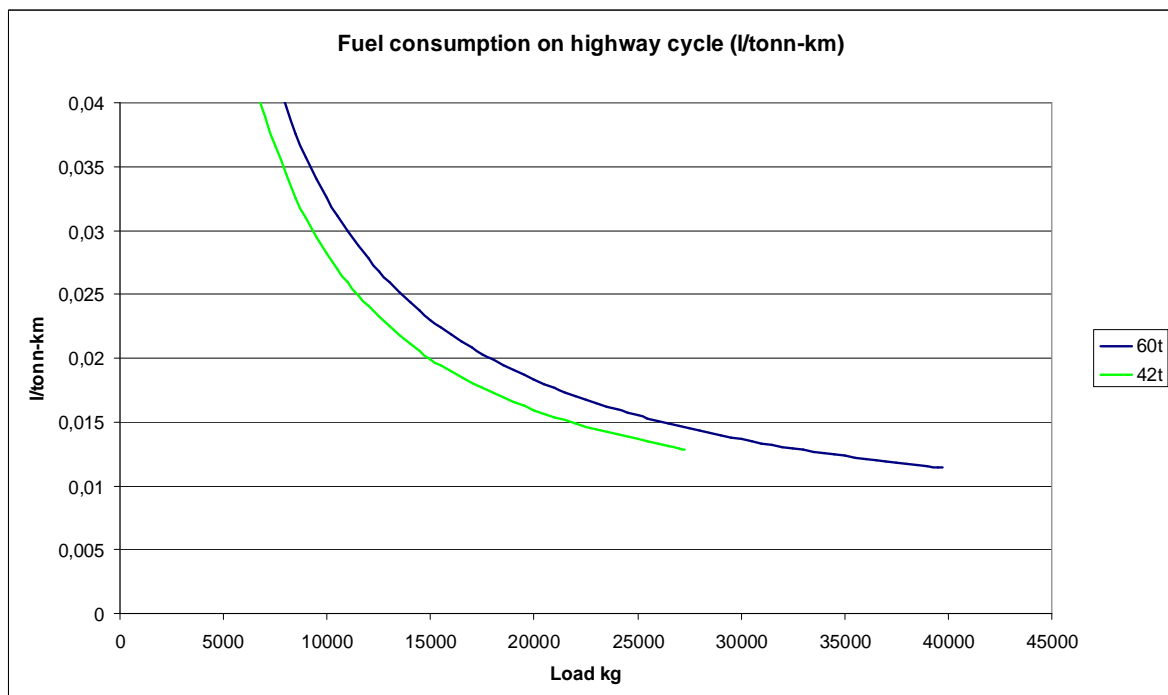
Dynamometrimittauksissa käytettiin eri autoja yksilöitä kuin maantierullauksissa. Molemmat autot olivat Volvota lainaksi saatuja uusia yksilöitä. 42 t yhdistelmän vetoauto mittauksissa edusti Volvo FH 440, päästöluokaltaan Euro IV ja 60 t yhdistelmän vetoautoa Volvo FH 480, päästöluokaltaan Euro V. Molemmat ajoneuvotyypit on varustettu SCR-katalysaattorilla ja vastaavilla autoilla aikaisempien mittauksien perusteella tiedetään, että niiden ominaiskulutuksissa ei ole merkittäviä eroja.

Dynamometrimittauksilla määritettiin autoille kulutuslukemat. Energiatohokkuuden selvittämistä varten kulutukset laskettiin hyötykuorman suhteen muotoon litraa per tonnikilometri. Tulokset on laskettu kahden peräkkäisen mittauksen keskiarvona.

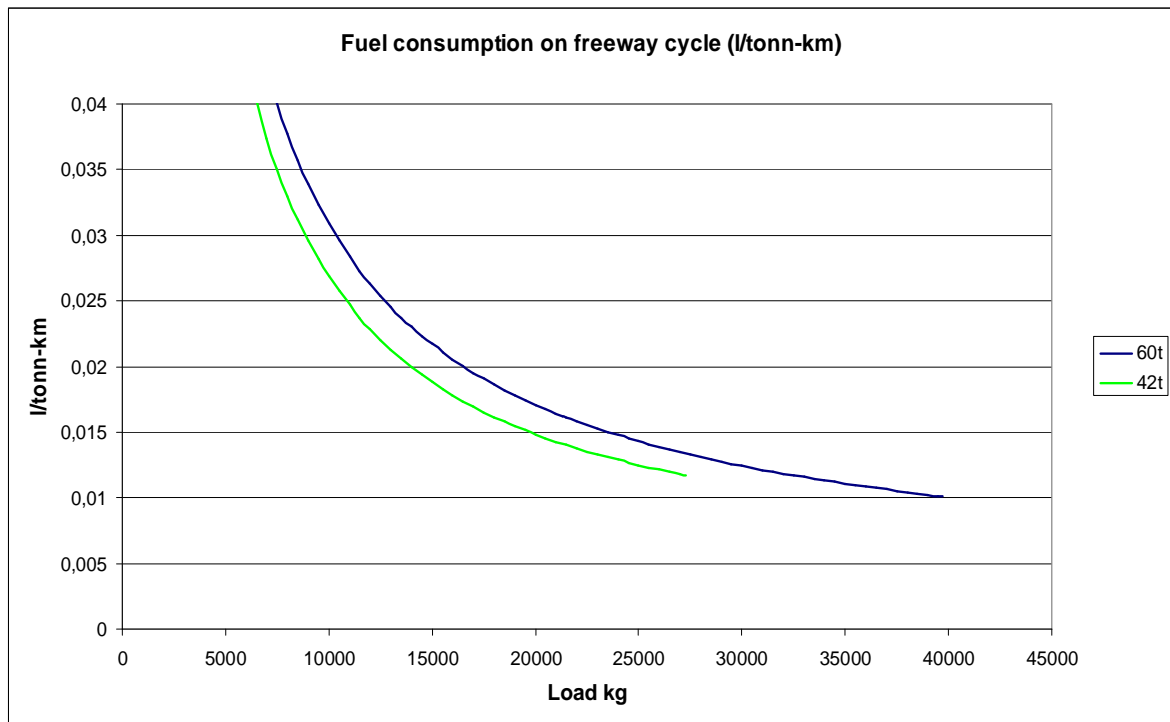
Molempien ajoneuvojen kulutusmittausten tulokset ovat kuvassa 4.6. 42 t yhdistelmän maantiekulutukset olivat tyhjällä autolla 25,5 l/100 km ja täydellä kuormalla 35,6 l/100 km. Moottoritiellä vastaavasti 24,7 l/100 km ja 32,0 l/100 km. 60 t yhdistelmällä luvat maantiellä olivat 28,7 l/100 km tyhjänä ja 45,4 l/100 km täydessä kuormassa. Moottoritiellä vastaavasti 27,4 l/100 km ja 40,1 l/100 km. Kulutukset litraa per tonnikilometri ovat kuvissa 4.7 ja 4.8. Tarkat arvot täydellä kuormalla ovat 42 t yhdistelmän osalta maantiellä 0,013 litraa/tonni-km ja moottoritiellä 0,012 litraa/tonni-km. 60 t yhdistelmälle luvat ovat maantiellä 0,011 litraa/tonni-km ja moottoritiellä 0,010 litraa/tonni-km.



Kuva 4.6 Maantie- ja moottoritiekulutukset ajetuilla kuormilla



Kuva 4.7 Maantiekulutus litraa/tonni-km



Kuva 4.8. Moottoritiekulutus litraa/tonni-km

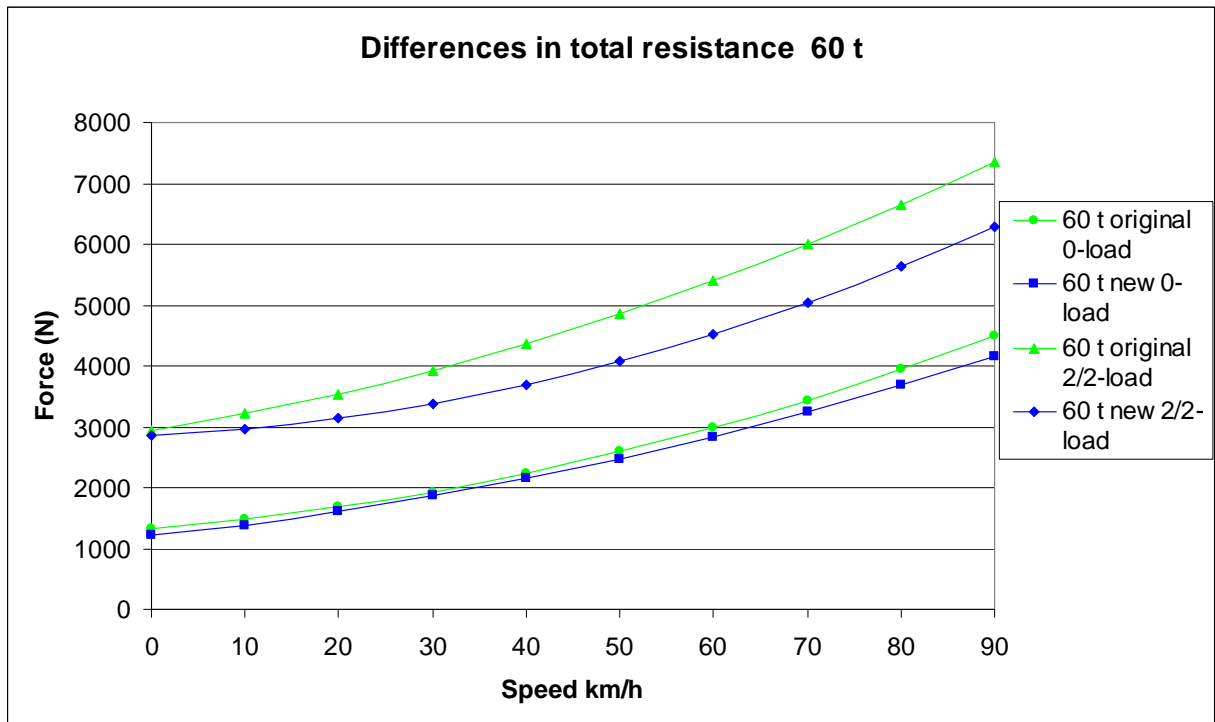
Tuloksista voidaan havaita, että 42 tonnin yhdistelmä on 60 t yhdistelmää energiatehokkaampi täyteen 42 tonnin kuormaan asti. Täyteen kuormatulla 60 t yhdistelmällä saavutetaan parempi energiatehokkuus kuin 42 tonnin yhdistelmällä parhaimmillaan.

Aerodynamiikan osalta vertailupari on nykyaikainen. Hytti kokonaisuudessaan on aerodynaamisesti muotoiltu, sen lisäksi katolla on ilmanohjain ohjaamassa ilmavirtaa kärryn yli ja hytin sivuilla ohjaimet ohjaamassa ilmaa kärryn ohi.

Vertailutulokset pätevät toisiaan vastaaville ajoneuvoyhdistelmille. Lopputuloksen kannalta on suuri merkitys sillä, millaiset autot vertailupariksi valitaan. Erilainen pari voi tuottaa erilaisen lopputuloksen. Tämä mittaus ei myöskään mitenkään kuvaa ajoneuvoyhdistelmien kokonaistaloudellisuutta, johon vaikuttavat mm. kuljettajien palkat, tarvittavan ajoneuvokaluston määrä ja kuormatilan tilavuus. Kokonaispainoltaan 60 tonnin yhdistelmän kuormatilan kokonaistilavuus on merkittävästi isompi, jolloin siitä on etua kokonaistehokkuuden kannalta niissäkin tilanteissa, joissa kuormat ovat painomäärällä mitattuna vajaita mutta koko kuormatilan täyttäviä. Yhdistelmätyypistä ja kuljetettavasta kuormasta riippumatta turhan massan kuljettaminen mukana yhdistelmän rakenteissa lisää aina kulutusta ja siten syö tulosta, oli yhdistelmä sitten kuormattu täyteen tai ei. Tämän vuoksi kuljetusliikkeiden pitäisi pohtia kalustoaan kokonaisuuden kannalta, esim. onko jalkalavalaitteista saatava hyöty oikeasti ylimääräisen omapainon, huonomman hyötykuorman ja tätä kautta huonomman energiatehokkuuden eli kulutuksen kannalta järkevä järjestelmä.

4.4.4 Vertailu HDenergia-projektin tuloksiin

HDenergia-projektissa mitattujen rullausten tuloksia verrattiin nyt tehtyihin rullauksiin ja havaittiin, että 42 t yhdistelmän kanssa ei ollut mittaustarkkuuden rajoissa merkittäviä eroja, mutta 60 t yhdistelmän osalta kyllä. Tämä oli odotusten mukaista, kun verrataan silloista yhdistelmää nyt käytettyyn.



Kuva 4.9. 60 t yhdistelmien kokonaisvastukset vanha vs. uusi

Kuvasta 4.9. voidaan havaita, että nyt mitattu 60 t yhdistelmä rullasi huomattavasti paremmin kuin aikaisempi yksilö. Varsinkin täyden kuorman tuloksissa ero on merkittävä.

Merkittävimmät erot vanhan ja uuden yhdistelmän välillä ovat nyt mitatun yhdistelmän huomattavasti parempi aerodynamiikka ja vähäisempi omapaino. Tyhjän yhdistelmän kokonaispainossa oli eroa 5300 kg uudemman yhdistelmän hyväksi ja tämä on suoraan käytettävissä hyötykuormaan. Sen lisäksi se on suoraan pois kulutuksesta tyhjänä ajattaessa. Painoerot syntyvät mm. vetoauton kiinteästä kuormatilasta, joka on jalkalavakonttia huomattavasti kevyempi sekä perävaunusta, joka pressutyypisenä on kiinteäkorista kevyempi. Aerodynamiikan osalta erot tulevat siitä, että vanha yhdistelmä oli matalalla hytillä ilman mitään erillisiä ilmanohjaimia ja korkean jalkalavakontin kanssa epäedullinen ilmanvastukseltaan.

Perävaunun osalta kulutuseta pienen omapainon lisäksi muodostuu siitä, että 60 t yhdistelmässä perävaunussa on yhteensä viisi akselia, joista kärryssä kolme ja dollyssa kaksi. Tällainen perävaunu rullaa kevyemmin kuin neliakselinen varsinkin kuormattuna.

4.5 RENGASMITTAUKSET (VTT)

Vuosina 2006 ja 2007 tehtiin laaja sarja mittauksia renkaiden vaikutuksesta raskaiden ajoneuvojen polttoaineenkulutukseen. VTT:n alustadynamometrille kehittämä ajovastusten mittaamenetelmä mahdollistaa vapaasti rullaavien renkaiden lisäksi myös vedon alaisten renkaiden sekä voimansiirron vaikutusten mittaamisen. Menetelmän tarkkuutta on arvioitu vertaamalla sitä viralliseen vierinvastusmenetelmään sekä maantiemittauksista saatuihin tuloksiin. Tulokset on raportoitu yksityiskohtaisesti aiemmissa vuosiraporteissa.

Kuorma-auton perävaunun, vetoakselin ja etuakselin renkaiden oikeilla valinnoilla voidaan säästää polttoaineen kulutuksessa jopa yli 10 %. Turvallisuustekijöitä ei kuitenkaan tule unohtaa. Vaikka rengas olisikin polttoaineen kulutuksen kannalta hyvä, ei se välttämättä ole pito-ominaisuuksiltaan optimaalinen. Sama pätee myös toisinpäin. Yleisesti voidaan todeta että talviolosuhteisiin suunniteltu rengas ei ole polttoaineen kulutuksen kannalta kilpailukykyinen kesäkelin renkaan kanssa. Talvikelin rengas kuluttaa enemmän polttoainetta ja siksi talvikelin renkaan käyttö kesällä ei kannata. Kulunut talvikelin rengas oli polttoainetalouden kannalta hieman jopa vertailussa ollut kesäkelin rengasta parempi, mutta sen pito-ominaisuudetkaan eivät enää ole uudenveroiset. Renkaan rakenne oli kuitenkin järkevästi tehty, eli kun rengas kuluu tarpeeksi kuluvat lamellit pois ja renkaan luisto pienenee.

Vuonna 2007 tutkittiin vetoakselin renkaiden vaikutusta kulutukseen. Pitkänmatkan bussissa kulutusero poikittaiskuvioitujen renkaiden välillä oli suurimmillaan 3,3 %. Vastaavasti ero vierinvastuksissa oli noin 25 %. Pitkittäiskuvioitujen renkaiden kulutusero oli 1,8 %. Mittauksissa havaittiin, että vetävillä pyörillä renkaan vierinvastuksen ja kulutuksen välillä ei välttämättä ollut korrelaatiota.

Kaupunkibussin tapauksessa kulutustulokset Braunschweig-syklistä olivat lähellä maantiesyklin tuloksia. Renkaiden vaikutus oli kaupunkiajossa lähes samaa suurusluokkaa kuin maantieajossa (ääripäitä tarkasteltaessa). Kulutusero mitattujen poikittaiskuvioitujen renkaiden välillä kaupunkisyklissä oli suurimmillaan 2,5 %. Pitkittäiskuvioitujen renkaiden välillä ero oli 2,6 %. Kuorma-autolla tehdyissä mittauksissa kulutusero renkaiden välillä oli suurimmillaan 3,7 %.

4.6 AERODYNAMIIKKA

4.6.1 Yleistä

Aerodynamiikka-osuus perustuu pääosin kahteen TKK:lla tehtyyn diplomityöhön.

Raskaan ajoneuvon yksityiskohtainen geometria on erittäin monimutkainen. Virtaus ajoneuvon ympärillä on kokonaan kolmiulotteinen. Virtaus on vahvasti epäsymmetrinen ja turbulenttinen. Painegradientin vaihtelut ovat jyrkkiä, virtauksen irtoamista ja uudelleen kiinnittymistä tapahtuu jatkuvasti. Ajoneuvon toimintaympäristö vaihtelee suuresti ajan ja tilan funktiona, ajoneuvon ja ympäristön eri nopeuskomponentit yhtyvät tuskin

koskaan. Pyörivät renkaat, alustan epäjatkuvuuskohdat ja maaefekti tukevat virtauksen monimuotoisuutta. Taakseen ajoneuvo jättää suuren, turbulenttisen vanaveden.

Raskaita ajoneuvoja ei ole suunniteltu tiettyä aerodynaamista efektiä silmällä pitäen. Päinvastoin, muodon määrää toiminnallisuus, muodon taloudellisuus ja estetiikka. Kuorma-autojen evoluutio paljastaa aerodynaamisen kehityksen keskittyneen viime vuosikymmeninä yhdistelmän etupäähän: ohjaamoon ja kuormatilan etureunaan. Nykyisin käytettävien kuorma-autojen ohjaamot muistuttavatkin aerodynaamisesti toisiaan. Varsinaisten kuormatilojen aerodynaamiset parannukset ovat jääneet vähemmälle huomiolle, ne ovat laatikkomaisia ja teräväkulmaisia. Tilavuuden maksimointi lain sallimissa rajoissa on vääjäämättä johtanut nykyisiin ratkaisuihin.

Vastusta ei voi poistaa kokonaan mistään virtauksen kanssa vuorovaikutuksessa olevasta kappaleesta. Aerodynaamisen vastuksen minimoimiseksi on virtauksen luonne tunnettava. Kun paikalliset olosuhteet ovat tiedossa, pyritään virtausta ohjaamaan myötävirtaan mahdollisimman pienillä energiahäviöillä. Virtauksen tulisi pysyä kappaleessa kiinni laminaarisena, jotta hyötysuhde olisi maksimaalinen. Virtauksen pitäminen laminaarisena kuorma-auton pinnoilla on kuitenkin mahdoton tehtävä. Jo virtauksen pitäminen kokonaisvaltaisesti kiinnittyneenä kuorma-autoon, edes turbulenttisenä, on mahdotonta, ellei käytännön rajoitteista tehdä äärimmäisiä kompromisseja.

4.6.2 Kuorma-autot

Perinteisesti kuorma-autojen suunnittelua on ohjannut tarve maksimoida kuormatilan koko ja tehdä kuorman lastaus ja purku mahdollisimman helpoksi. Aerodynaamisen muotoilun kannalta tilanne on kuitenkin haastava, sillä kehitys on kulkenut väärään suuntaan lähes sadan vuoden ajan. Killströmin diplomityössä asetettiin tavoitteeksi etsiä keinot 60 –tonnisen yhdistelmän ilmanvastuskertoimen puolittamiseksi.

Kuorma-auton vastusta voidaan pienentää ennen kaikkea modifioimalla keulan ja takapään muotoja. Tavoitteena on vähentää keskimääräistä keulan etuosan painetta ja kasvattaa keskimääräistä peräpainetta. Toisin sanoen kyse on paine-eron minimoinnista ajoneuvon etu- ja takapään välillä. Vastusminimiä haettaessa on kuitenkin syytä muistaa yksinkertaisetkin seikat, kuten kuormatilojen pintojen suoruus, laatu ja puhtaus.

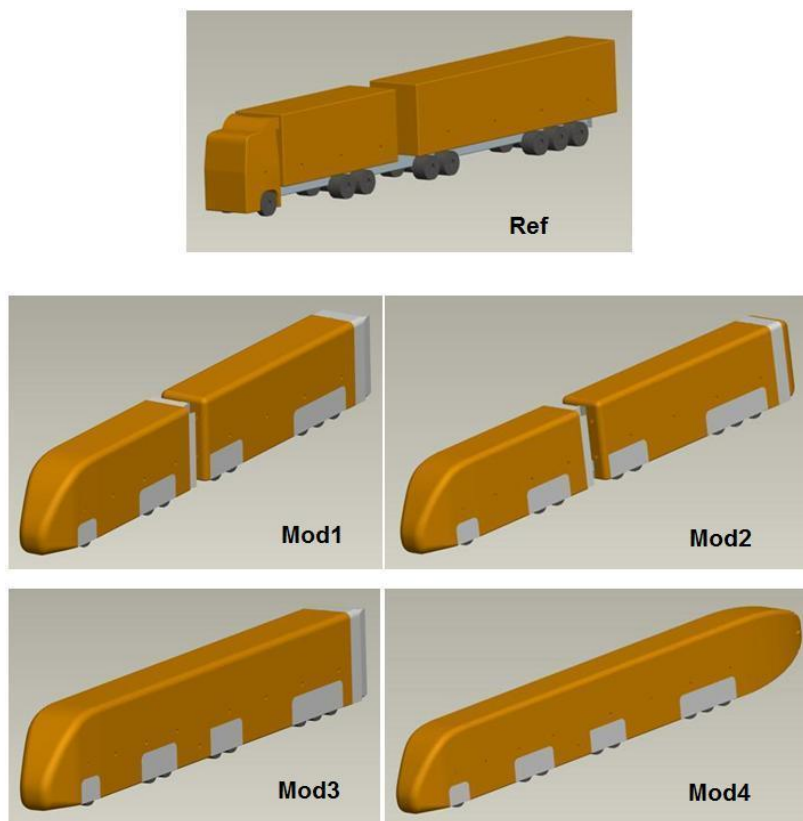
Kuorma-auton vastuksen pienentämisessä on kyse kokonaisuudesta. Yksittäisen osan aerodynaaminen parantaminen saattaa pienentää vastusta tarkasteltavassa kohdassa, mutta samalla myötävirrassa olevan osan vastus voi pahimmassa tapauksessa kasvaa. Vastuksien relaatioista toisiinsa on kehitetty teorioita, mutta ne eivät ole vielä sellaisinaan sovellettavissa kuorma-autojen aerodynamiikkaan.

Tuulitunnelimallit

Vastusmittauksia varten valmistettiin kaksi kappaletta tuulitunnelimalleja, referenssimalli ja alhaiseen vastuskertoimeen tähtäävä modulaarinen modifioitu malli. Mallit toteutettiin mittakaavassa 1:10. Referenssimalli jäljitteli pääpiirteiltään nykyisin käytössä olevia varsinaisia täysperävaunuyhdistelmiä. Modifioidun mallin tapauksessa käytännön rajoitteet oli alun perin tarkoituksena jättää huomiotta, mutta suunnittelussa on kuitenkin

kin jossain määrin pyritty pitämään mielessä täysikokoisen aerodynaamisen yhdistelmän toteuttamiskelpoisuus. Koska työn tavoite, vastuskertoimen puolittaminen on äärimmäisen haastava, on osa aerodynaamisista muodoista viety tarkoituksenmukaisesti äärimmäisyyksiin.

Ohjaamon muotoihin haettiin vaikutteita luotijunan keulasta. Ohjaamo päätettiin jatkaa eteenpäin nykyisestä noin 1,5 m. Samalla kuljettajan sijoitus on ajateltu keskelle ohjaamo. Ohjaamon takaseinä siirrettiin kuormatilaan saakka, jolloin osien välinen rako saatiin poistettua. Ohjaamon nuolimuotoa kasvatettiin 15 asteeseen. Kulmapyöristykset on mitoitettu Reynoldsin luvun mukaan siten, että virtaus irtoaisi maantienopeuksissa mahdollisimman vähän. Kuormatilojen väliin asennettiin jättöreunalaipat ja rajakerrosaita. Vaihtoehtoisesti väli voidaan sulkea kokonaan. Yhdistelmän perään suunniteltiin kolme erilaista muotoa: 10 asteen jättöreunalaipat, takareunakaaret, sekä varsinainen boat-tail. Näistä kahta ensin mainittua on mahdollista käyttää myös jättöreunapuhalluksella.



Kuva 4.9. Tuulitunnelimallit.

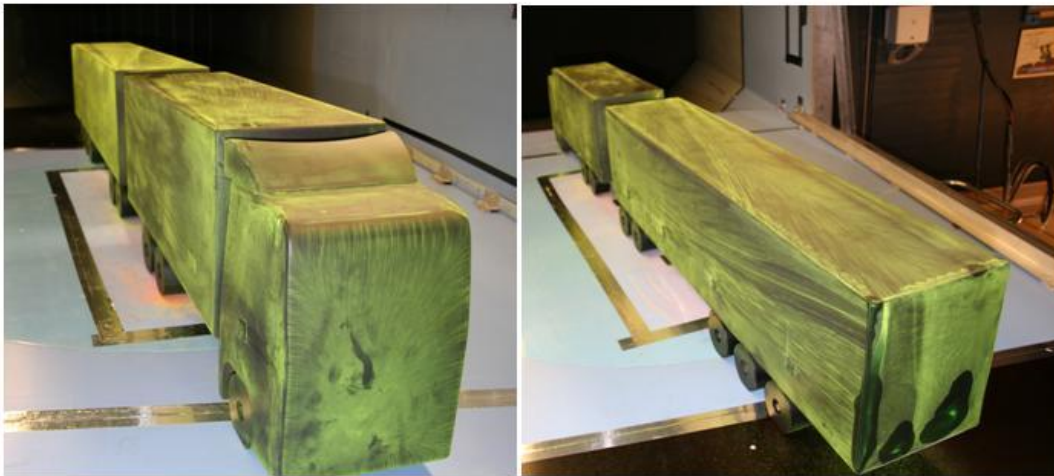
Tuulitunnelimalleille on yksi yhteinen 150x100x4mm teräsrunko, johon päälirakenteet ja pyörät kiinnitetään pulttiliitoksien. Vanerista valmistetut pyörät ovat kiinteät ja niiden

alaosa on katkaistu tasomaiseksi. Mallien pohja on yksinkertaistettu, taustapeilejä ja moottorin jäähdytysilman virtauskanavaa ei ole mallinnettu. Ulkopinnat ovat huolellisen pohjatyön jälkeen maalattu tummalla mattamaalilla. Mittauksissa käytetyt mallit ja nimikkeet selviävät kuvasta 4.9.

Tuulitunnelikokeet

Kuorma-auton suurimmalla sallitulla nopeudella 80 km/h:ssa ja suuntakulmalla 15° sivutuulikomponentiksi saadaan noin 6 m/s, joka vastaa Suomessa vallitsevan tuulennopeuden vuosikeskiarvon maksiminopeutta. Tällä perusteella vastusarvot mitattiin viiden asteen suuntakulmaporrastuksin arvoilla -15° , -10° , -5° , 0° , 5° , 10° , ja 15° . Kaikki mallit mitattiin vähintään kahdella eri nopeudella, 40 m/s ja 45 m/s. Suurempi nopeus aiheutti tietyille kombinaatioille voimakasta värähtelyä, jonka takia kyseiset mittaukset jouduttiin keskeyttämään. Kunkin mittapisteen arvo tietyllä nopeudella ja suuntakulmalla on keskiarvo kymmeneltä mittaustallenteelta.

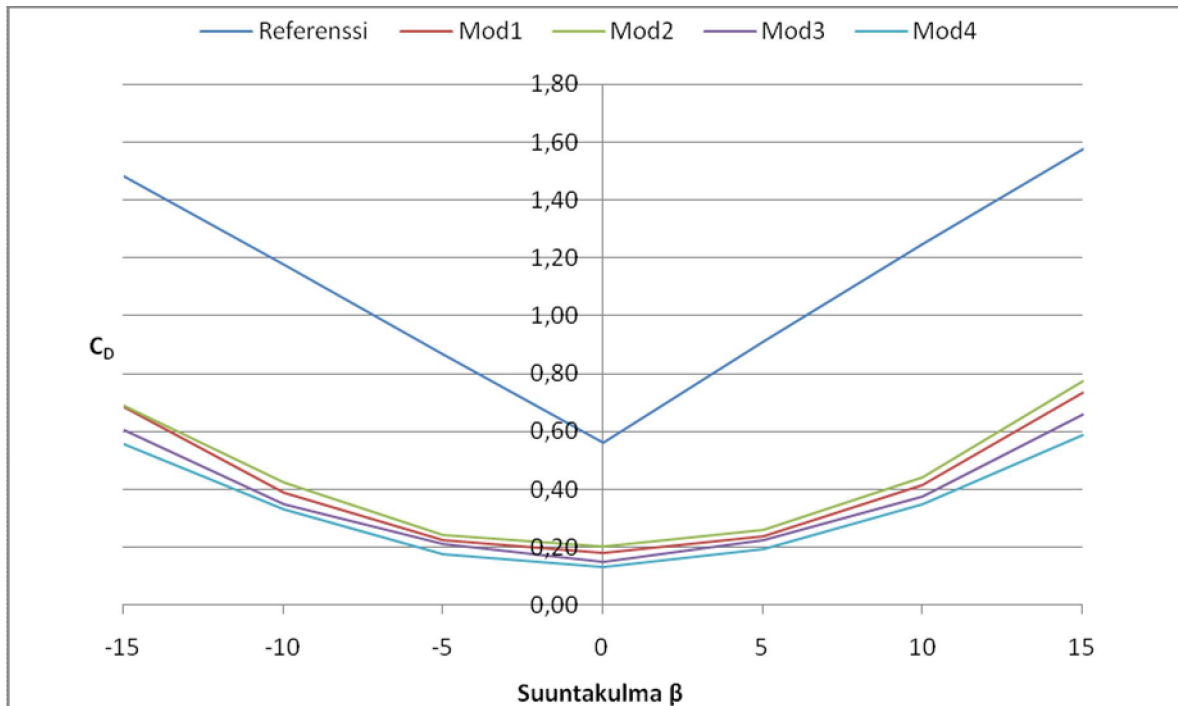
Vaa'alta saadun datan lisäksi virtauksen käyttäytymistä tarkasteltiin väriainekokein. Referenssimallin värikoe osoittaa virtauksen voimakasta irtoamista ja pyörteilyä, kuva 4.10.



Kuva 4.10. Referenssimallin värikoe 10° suuntakulmalla.

Kaiken kaikkiaan voimamittauksia suoritettiin seitsemälle eri mallikombinaatiolle. Tuloksista laskettiin vastuskerroin, tuulitunnelikorjaus ja korjattu vastuskerroin. Tuulitunnelimallien vastuskertoimet on esitetty kuvassa 4.11. Aerodynaamisten yhdistelmien vastuskertoimet ovat odotetusti huomattavasti referenssiä pienempiä. Parhaimpaan tulokseen päästiin varsinaisella boat-tail-perällä varustetulla Mod4-mallilla. Sen vastuskerroin on yli 76 % referenssiä pienempi suuntakulmalla nolla. Heikoiten vastusta pienentää malli Mod2, jonka vastuskerroin on noin 64 % alle referenssin virtauksen ollessa suoraan edestä. Mielenkiintoista on huomata, että kaikki modifioidut mallit pienentävät vastuskerrointa suuntakulmalla viisi enemmän kuin kulmalla nolla. Kulman ollessa

kymmenen astetta, vastuksen alenema on karkeasti yhtä suuri kuin kohdassa nolla astetta.

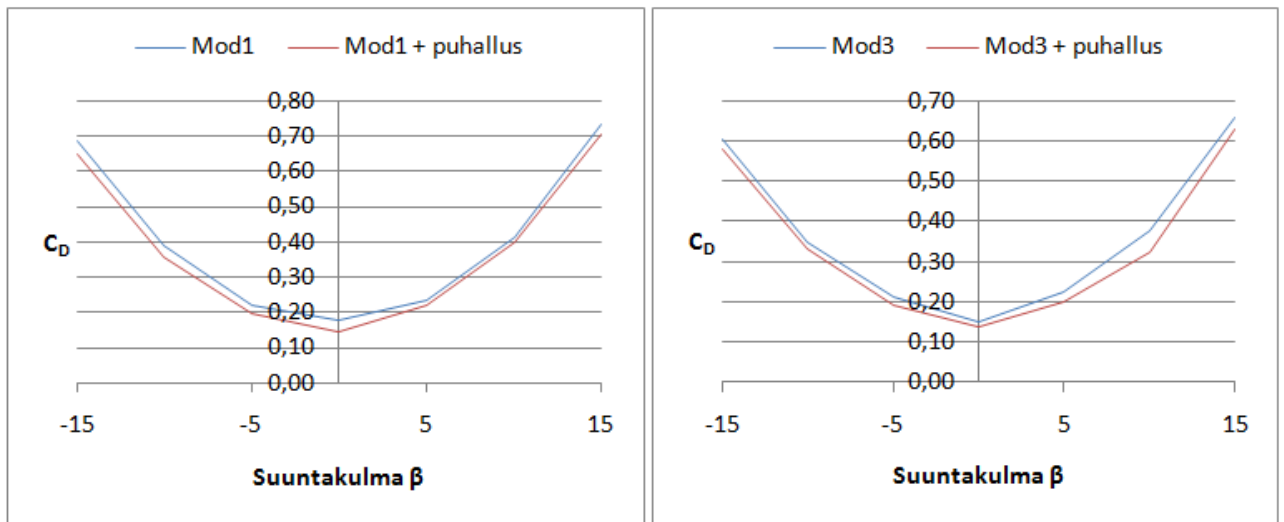


Kuva 4.11. Tuulitunnelimallien vastuskertoimia nopeudella 45 m/s.

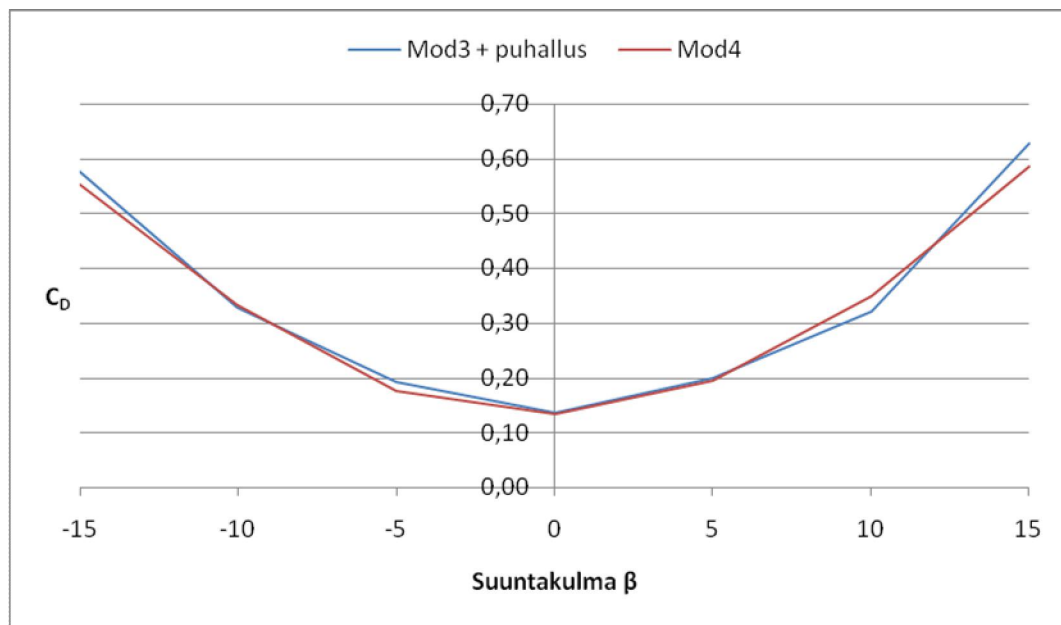
Jättöreunapuhalluksen vaikutus vastuskertoimeen testattiin malleilla Mod1 ja Mod3. Puhalluksen nopeus oli molemmissa tapauksissa noin 105 m/s eli hieman yli 2,3-kertainen ajonopeuteen verrattuna. Paineilmaletkulla mallin sisään tuotu virtaus puhallettiin perävaunun jättöreunan kaikilta neljältä sivulta. Puhallus muodostaa ikään kuin virtuaalisen boat-tail-perän. Kuvassa 4.12 on vertailtu vastuskertoimia puhalluksella ja ilman. Mallin Mod1 tapauksessa puhallus pienensi vastuskerrointa parhaimmillaan noin 19 %, kun taas Mod3:n vastaava arvo oli noin 9 %.

Kun verrataan peräpuhalluksettoman ja puhalluksellisen mallin alhaisimpia vastuskombinaatioita havaitaan kertoimien olevan hyvin lähellä toisiaan, kuva 4.13. Käytännöllisyyden ja toteuttamiskelpoisuuden nimissä jättöreunapuhallus on selkeä valinta. Puhallusnopeutta lisäämällä vastusta on mahdollista pienentää entisestään.

Kuorma-autojen aerodynaamisessa tehokkuudessa riittää siis kehitettävää. Suuri osa keinoista ilmanvastuksen pienentämiseksi on ollut tiedossa jo vuosikymmeniä. Ne eivät ole saavuttaneet suurta suosiota markkinoilla johtuen operoinnin vaikeutumisesta, huonosta taloudellisesta hyötysuhteesta ja yhteensovittamisen tuomista ongelmista. Raakaöljyn kallistuminen aikaansaa kuitenkin käyttämättömän aerodynaamisen teknologian taloudellisesti elintärkeäksi. Ollaan tilanteessa, jossa vain prosenttien ilmanvastuksen pieneminen aikaansaa huomattavat säästöt.



Kuva 4.12. Jättöreunapuhalluksen vaikutus vastukseen nopeudella 45 m/s.



Kuva 4.13. Jättöreunapuhalluksen ja varsinaisen boat-tail-perän vastuskertoimien vertailu nopeudella 45 m/s.

4.6.3 Linja-autot

Kuorma-autoihin verrattuna linja-auton suunnittelussa on huomattavasti vapaammat kädet. Lisäksi kuorma-autoon verrattuna linja-autoilla on aerodynaamisesti edullisemmat muodot, sillä auto on periaatteessa vain yksi suorakulmainen särmiö. Kuten aina hyviin aerodynaamisiin ominaisuuksiin pyrkiessä, tulee myös linja-autoissa pyrkiä ta-

soittamaan kaikki ulkopintojen epätasaisuudet. Nykyaikaiset pikavuoroautot ovatkin jo usein varsin hyvin huoliteltuja pienten yksityiskohtien osalta.

Helpoin tapa vastuksen vähentämiseen on pyöristää etukulmat ja katon etureuna. Keulan aerodynamiikkaa voidaan parantaa myös viistämällä keulaa sivuilta tai kallistamalla keulaa yläreunastaan taaksepäin. Molemmat vaihtoehdot ovat rakenteellisesti haastavampia toteuttaa kuin pelkkä kulmapyöristys. Vastuksen kannalta alhaisimpaan tulokseen päästään kuitenkin, kun kaikki keinot hyödynnetään, eli tehdään sivuilta viistetty ja kallistettu keula jonka kaikki kulmat on reilusti pyöristetty. Auton kokonaisvastuksen kannalta merkittävää on myös keulan alaosan muotoilu; mitä alemmas keula yltää, sitä vähemmän auton alle ohjautuu ilmaa.

Perän muotoilu on ehkä vielä haastavampaa kuin keulan muotoilu, sillä useita auton toiminnan vuoksi tärkeitä kohteita sijaitsee takaosassa. Keulan tavoin yksinkertaisin keino vastuksen vähentämiseen on pyöristyksien tekeminen kulmiin ja katon takareunaan. Paras tulos saataisiin niin sanotulla boat-tail -muodolla, jossa katto ja kyljet ovat pitkältä matkalta viistetyt. Nykyaikaisissa pitkän peräilytyksen omaavissa linja-autoissa pohja on jo muista syistä reilusti viistetty. Viisteen sivut tulisi olla hyvin pyöristetyt, jotta viiste imisi ilmaa alustan ohella myös auton kyljiltä. Pohjan ja perän välinen kulma tulisi myös pyöristää reilusti.

Linja-autoissa merkittävä suunnittelunäkökohta on ajoneuvon käyttäytyminen sivutuulen vaikutuksessa. Yksinkertaisin keino vähentää sivutuulen vaikutusta on pyöristää katon sivureunoja reilusti. Myös keulan ja perän kulmien pyöristäminen auttaa tilannetta huomattavasti.

4.7 RASKAIDEN AJONEUVOJEN MASSA (TURKUAMK)

Tarkoituksena oli selvittää, mitkä ovat Suomessa liikennöivissä raskaissa ajoneuvoyhdistelmissä käytettävien vetoautojen ja perävaunujen omamassat, niiden jakaumat ja vaihteluvälit. Jos omamassaa kyettäisiin vähentämään lujisuuden kärsimättä, kantavuus lisääntyisi. Tällöin hyötykuorma kasvaisi ja polttoaineenkulutus sekä CO₂-päästöt suhteutettuna hyötykuormaan alenisivat.

Tarkastelu rajoitettiin Ajoneuvorekisteristä poimittuihin v. 1995 ja sen jälkeen rekisteröityihin täys- ja puoliperävaunuyhdistelmiin. Tarkastelussa olivat mukana ainoastaan umpikoriset sekä täysperävaunuyhdistelmien yhteydessä myös irtopeitteellä varustetut kappaletavaralavat.

Selvä havainto oli, että omamassaeroja toisilleen vertailukelpoisissa ajoneuvoissa esiintyy. Omamassoissa ei ole tapahtunut radikaaleja muutoksia kuluneen runsaan kymmenen vuoden ajalla: ainoastaan täysperäveturien massa on kasvanut tarkastelujaksolla.

Saavutettavissa olevan massavähennemän perusteella laskettiin esimerkit tapauksesta, jossa kokonaisuudessa pidetään vakiona ja hyödynnetään lisäkantavuus, sekä tapauksesta, jossa hyötykuorma pidetään vakiona ja hyödynnetään vähentynyt kokonaisuudessa.

Ensimmäisessä tapauksessa laskettiin kulutus- ja CO₂-päästövähennykset tonnikilometriä kohti, ja toisessa kulutus- ja CO₂-päästövähennykset ajettua kilometriä kohti. Lisäksi tiilastoitujen suoritemäärien pohjalta laskettiin vaikutus koko Suomen vuotuisen polttoaineentarpeeseen ja CO₂-päästömääriin (taulukko 4.2).

Taulukko 4.2. Keskimääräisten ja kevyimpien yhdistelmien omamassaeroista lasketut tunnusluvut tiivistettyinä.

TÄYSPERÄVAUNUYHDISTELMÄT		Keskimäärin	Kevyimmät	Erotus
Nykyisten yhdistelmien omamassa (kg)		23 600	20 350	3 250
Kuljetussuoritekohtaiset vähennykset (kok.massa vakio)	kulutus (l/tonni-km)	0.0012		
	CO ₂ (g/tonni-km)	3		
Ajomatko-kohtaiset vähennykset (kuorma vakio)	kulutus (l/100 km)	2.3		
	CO ₂ (g/km)	60		
Valtakunnall. vuotuinen kulutusvähennys (milj. l)		25		
Valtakunnall. vuotuinen CO ₂ -vähennys (tonnia)		62 000		

PUOLIPERÄVAUNUYHDISTELMÄT		Keskimäärin	Kevyimmät	Erotus
Nykyisten yhdistelmien omamassa (kg)		13 850	12 050	1 800
Kuljetussuoritekohtaiset vähennykset (kok.massa vakio)	kulutus (l/tonni-km)	0.0008		
	CO ₂ (g/tonni-km)	2		
Ajomatko-kohtaiset vähennykset (kuorma vakio)	kulutus (l/100 km)	1.1		
	CO ₂ (g/km)	30		
Valtakunnall. vuotuinen kulutusvähennys (milj. l)		3		
Valtakunnall. vuotuinen CO ₂ -vähennys (tonnia)		7 500		

4.8 AKSELISTOSUUNTAUS

4.8.1 Yleistä

Akselistopoikkeamalla tarkoitetaan ajoneuvon/kärryn akselin poikkeamakulmaa ajoneuvon keskilinjaan nähden. On yleisesti tunnettu tosiasia, että raskaankaluston perävaunujen akselitoissa on suuntauspoikkeamia. Poikkeamien yleisyyttä ei kuitenkaan tunnetta eikä myöskään niiden vaikutusta energiankäyttöön.

Ongelmaa lähdettiin ratkaisemaan työryhmän voimin johon VTT:n lisäksi kuului sekä suuntauslaittevalmistajien edustajia että raskaankaluston huoltoliikkeitä. Tutkimuksen kohteena oli Transpointin kalusto. Ennen projektin alkua kerätyn tutkimusaineiston mukaan suuntauksella voitaisiin saavuttaa huomattavaa kulutussäästöä.

Ensimmäinen vaihe tutkimuksessa oli selvittää akselistosuuntausvirheiden yleisyys ja suuruusluokka Transpointin kalustossa. Tämä toteutettiin tekemällä osapuolten välillä yhteistyötä siten, että suuntausmittaus saatiin toteutettua normaalin huoltotoiminnan

yhteydessä. Tuloksista kerättiin tietokanta, jonka pohjalta voitiin todeta kaluston nykytila sekä määrittää testikohteet seuraavaan vaiheeseen

Toisessa vaiheessa tietokannan perusteella valituille tyypillistä poikkeamaa kuvaaville virhetilanteille suoritettiin ajovastusmäärittely VTT:n menetelmällä. Toisen vaiheen tulosten perusteella voitiin määrittää kokonaisvastusero virhe- ja normaalitilanteen välille.

4.8.2 Tietokanta

Tietokantaan saatiin kerättyä jonkin verran tavoiteltua pienempi (30 kpl), mutta kuvaava määrä viisiakselisia perävaunumittauksia, joiden pohjalta voitiin määrittää tyypilliset poikkeamat. Taulukossa 4.3 on esitetty poikkeamien suurusluokat ja joitakin tapoja määrittää keskimääräinen tapaus. Keskimääräisen tapauksen määrittely on hankalaa pelkkien arvojen perusteella, koska suuntausvirheen laadulla on myös merkitystä. Taulukossa on suuntausvirheet esitetty muodossa mm/m. Yksi aste vastaa noin 17,5 mm/m.

Taulukko 4.3 Keskimääräiset suuntaus virheet Transpointin karruikalustossa. Oikean puoleisessa palstassa on esitetty eri akselien välisiä keskimääräisiä eroja, eikä se ole suorassa yhteydessä vasemman puoleiseen palstaan.

mm/m	1	2	3	4	5		1-2	3-4	3-5
avg	0.0	0.4	-0.3	-0.2	0.1	avg	1.0	0.7	1.2
median	0.1	0.0	-0.2	-0.3	0.1	median	0.7	0.4	0.7
mode	0.1	0.3	0.0	-0.3	0.7	mode	1.2	2.0	0.3
max +	3.7	3.7	2.4	1.9	5.3	max	5.3	2	6
max -	-2.6	-2.0	-2.9	-3.4	-4.7	min	0.0	0.0	0.0

4.8.3 Ajovastusmäärittely

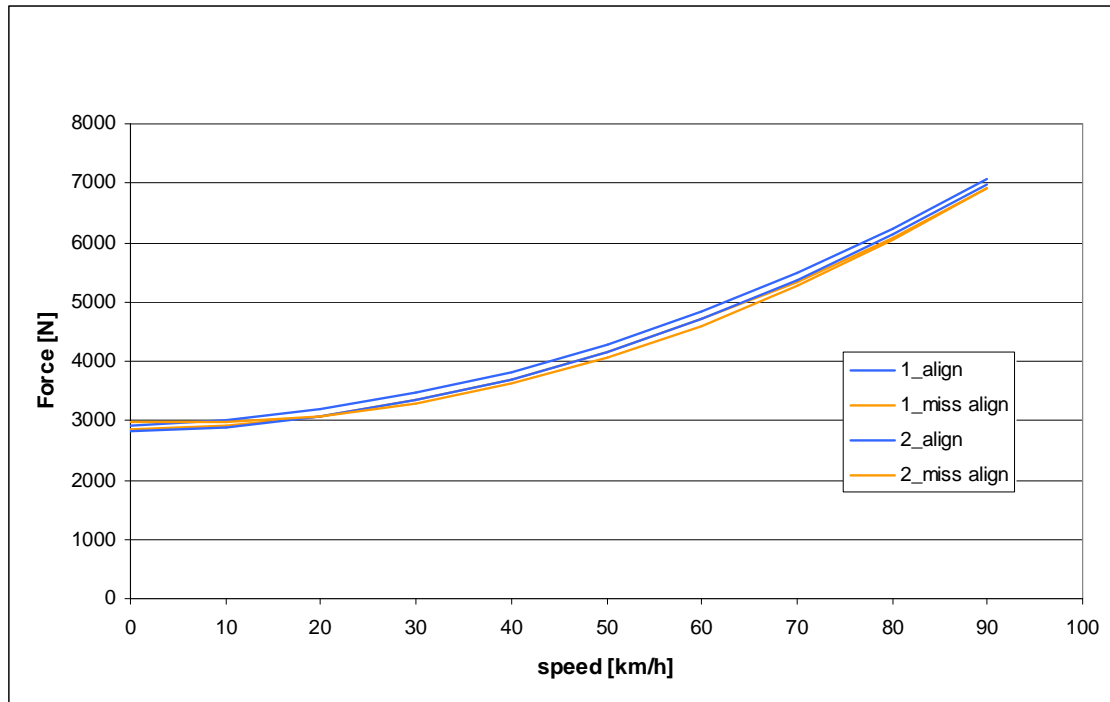
Akselistosuuntaustietokannan pohjalta voitiin määrittellä kaksi mielenkiintoista tapausta. Mittausta varten otettiin käyttöön viisi akselinen karru, johon ensin säädettiin haluttu virhetilanne. Maantiemittauksen jälkeen saman karrun akselit suoritettiin ja suoritettiin uusi maantiemittaus. Ensimmäinen tapaus edustaa keskimääräistä poikkeamaa ja mukaillee laadullisesti valittua todellista mittausta:

mm/m	1	2	3	4	5
1 missal.	-2.0	1.2	0.9	-0.6	-0.5
1 aligned	0.3	0.1	0.0	0.3	0.0

Toinen tapaus kuvaa mittasarjaan nähden suurta poikkeamaa ja on laadullisesti akselistosuuntauslaite-edustajan mukaan pahin mahdollinen tapaus, jossa akselistot ns. ”kiemurtelevat” toisiinsa nähden.

mm/m	1	2	3	4	5
2 missal.	5.6	1.4	5.3	0.3	4.6
2 aligned	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Kuvassa 4.14 on esitetty molempien kärryjen rullausvastukset virhe tilanteessa sekä suoristetuilla akseleilla. Kuvasta havaitaan, ettei virhetilanteiden ja suoristettujen akselien välillä ole havaittavissa mittatarkkuuden rajoissa eroa. Toisaalta kuvasta nähdään, kuinka yhtenevät tulokset suorilla akseleilla ovat. Tämä on osoitus mittausten menetelmän hyvästä toistettavuudesta ja siitä ettei ympäristötekijät ole vaikuttaneet testin tuloksiin.



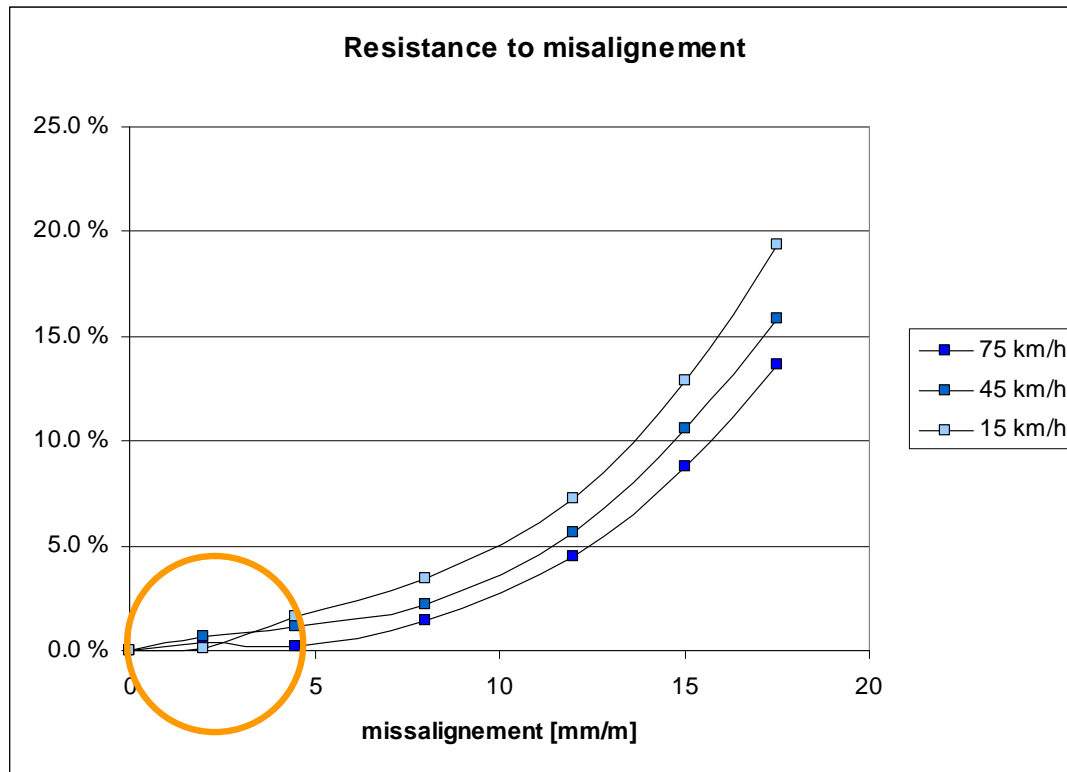
Kuva 4.14 Kokonaisvastuskuvaajat

Tulokset osoittavat, ettei Transpointin kalustossa esiintyvällä keskimääräisellä akselistosuuntausvirheellä ole merkittävää vaikutusta ajoneuvon kokonaisvastuksiin. Tulos poikkeaa vahvasti odotuksesta. Maantiemenetelmään rajallisen mittatarkkuuden ja akselistopoikkeaman todellisten vaikutusten selvittämiseksi jatkettiin tutkimusta VTT raskaan kaluston laboratoriossa.

Nokian renkaiden toteuttamassa tutkimuksessa tarkasteltiin suuntausvirheen vaikutusta renkaiden kulumiseen. Tarkastelun tuloksen mukaan kalustossa esiintyvien suuntausvirheiden ei voida katsoa aiheuttavan merkittävää kulumista renkaissa.

4.8.4 Akselistopoikkeaman vaikutus

Laboratoriotestit suoritettiin raskaalla alustadynamometrillä. Akselistopoikkeama toteutettiin säätämällä kokonaisaurasta kuorma-auton etuakselilla. Käytetty ajoneuvo oli Sisu-merkkinen, kaasukäyttöinen kuorma-auto. Rengastus oli Nokian NTR-843 295/80 R22.5 @ 8.0 bar. Akselikuorma mitatessa oli 4920 kg. Akseli rullattiin läpi usealla poikkeaman arvolla ja tuloksena saatiin määriteltyä poikkeaman vaikutus. (kuva 4.15)



Kuva 4.15. Akselistosuuntausvirheen vaikutus

Tuloksista nähdään, ettei virhealueella, jota tyypillinen Transpointin kalusto edustaa, esiinny merkittävää vastusvoiman kasvua. Maantiemittauksissa voidaan todentaa n. 4 % kokonaisvastuksen muutos. Akselistoikkeamana tämä tarkoittaisi n.12 mm/m (n.0,7 - astetta) virhettä. Lisäksi virheen pitäisi esiintyä suuruusluokkaisena kaikilla akseleilla, jotta sen vaikutus kokonaisvastukseen ja sitä kautta energiankäyttöön olisi noin 2 %. Rullausvastuksen kasvu ei vaikuta suoraan kokonaisvastukseen, koska suuremmissa nopeuksissa ilmanvastus kasvaa merkittäväksi.

Transpointin tapauksessa keskimääräiset virheet ovat suurimmillaankin niin pieniä, että akselistosuuntauksen merkityksen kaluston energiankäyttöön voidaan katsoa olevan erittäin vähäinen.

5 AJONEUVOJEN IT-SOVELLUKSET

Vastuutahot: VTT ja OY

Teksti: Kari Mäkelä & Kimmo Erkkilä (VTT), Matti Varanka, Kai Noponen & Tapio Seppänen (OY)

5.1 YLEISTÄ

IT-sovelluksia voidaan hyödyntää niin energiatehokkuuden, turvallisuuden kuin palvelutason parantamiseen. Jo HDenergia-hankeessa ideoitiin kolme järjestelmää, ajo-opastin, kuorman tunnistus ja liukkauden tunnistus, joita RASTU-hankkeessa on kehitetty edelleen ja viety pilotointiasteelle.

5.2 LINJA-AUTOJEN AJO-OPASTIN

5.2.1 Yleistä

Tässä raportissa kuvataan kaupunkilinja-autojen käyttöön suunnitellun reaaliaikaisen ajo-opastinlaitteen ominaisuuksia ja kehitystä. Reaaliaikainen ja aktiivinen ajo-opastin auttaa kuljettajaa ajamaan mahdollisimman taloudellisesti huomioimalla kuitenkin sen, että vuoro pysyy mahdollisimman hyvin aikataulussa. Ajo-opastimen kehitykseen ja HDenergia- sekä RASTU-projektin tuloksiin voi tutustua MOTIVA:n [www-sivuilla](http://www.motiva.fi/fi/julkaisut/liikenne/raskaankalustonenergian kaytto/ajoopastin.html):

<http://www.motiva.fi/fi/julkaisut/liikenne/raskaankalustonenergian kaytto/ajoopastin.html>

RASTU-projektissa kehitetyt ajo-opastimen prototyyppilaitteet alkoivat kerätä perustietoa vuoden 2007 alkupuolelta lähtien. Varsinainen opastus ehdittiin saada päälle vasta kesällä 2008 viiteen Jokeri-linjan (550) bussiin. Tämän raportin painopiste on näiden Jokeri-linjan autoista saatujen mittaustulosten analysoinnissa. Tässä kuvataan myös lyhyesti ajo-opastimen kehitystyö ja toimintaperiaate.

5.2.2 Ajo-opastimen kehittäminen

Ajo-opastimen opastuslogiikka ja laitteen prototyyppi kehitettiin HDenergia-projektissa. Ajo-opastimen prototyyppilaitte kehitettiin ohjelmistoksi kannettavaan tietokoneeseen. Opastimen jatkokehitys edellytti kuitenkin itsenäisen opastinlaitteen suunnittelun ja testaamisen, joka jatkui RASTU-projektissa. Opastimien ohjelmistoon sisältyy tiedonkeruu ajoneuvon liiketilasta, polttoaineenkulutuksesta sekä paikkatiedosta.

Ajo-opastinlaitteiden asennukset kaupunkibusseihin testauskäyttöön alkoivat vuodenvaihteessa 2006–2007. Tässä ensimmäisessä testausvaiheessa opastinlaitteissa oli käytössä vain tiedonkeruu, eikä opastinlogiikkaa ollut vielä mukana. Vuodenvaihteessa 2006–2007 asennettiin viisi ajo-opastinlaitetta Jokerilinjalle (YTV). Touko-kesäkuussa 2007 asennettiin viisi laitetta linjalle 58 ja marras-joulukuussa viisi laitetta Jyväskylän liikenteen autoihin. Laitteet alkoivat tuottaa perusdataa ajosta Jokeri-linjalta vuoden 2007 alusta lähtien, linjalta 58 kesästä 2007 lähtien, ja Jyväskylän liikenteen autoista syksystä 2007 lähtien.

Loppuvuodesta 2007 toteutettiin ajo-opastuksen algoritmi opastinlaitteeseen. Opastuksen toimintaa testattiin ja kehitettiin alkuvuoden 2008 aikana ilman kuljettajien osallistumista. Elokuussa 2008 koulutettiin ensimmäiset kuljettajat opastinlaitteen käyttöön ja tämän jälkeen opastus on ollut päällä viidelle kuljettajalle. Vuoden 2009 alkuun mennessä mittausaineistoa on kertynyt kaikkiaan vajaat 2 Gigatavua.

5.2.3 Ajo-opastimen toimintaperiaate

Ensimmäisen varsinaisen opastinprototyypin kanssa päätettiin keskittyä kaupunkibussin opastamiseen. Kaupunkibusseille on tyypillistä kiinteät ja toistuvat reitit ja suuret nopeusvaihtelut. Myös palvelutason ja etenkin aikataulussa pysymisen merkitys on henkilöliikenteessä suuri. Ajo-opastimen tehtävänä kaupunkibussiliikenteessä on

- 1) opastaa kuljettajaa ajamaan polttoainetaloudellisesti sekä
- 2) huolehtia aikataulussa pysymisestä.

Ajo-opastimen pääperiaate on ohjeistaa kuljettajaa kiihdyttämään ripeästi ja ajamaan mahdollisimman matalaa vakionopeutta aikataulujen puitteissa. Seuraavassa kuvataan tarkemmin, kuinka ajo-opastimen opastuslogiikka huolehtii näistä tehtävistä ja kuinka opastuslogiikkaa on kehitetty.

5.2.4 Opastimen simulointi

Ajo-opastimen logiikkaa ja toimintaa kehitettiin Teknillisessä korkeakoulussa Antti Lajusen diplomityössä tehdyillä simuloinneilla HDenergia-projektin alaisuudessa vuonna 2005. Simulointiin käytettiin MATLAB- ja ADVISOR-ohjelmia. Opastimen kehitystä varten luotiin MATLAB:iin visuaalinen simulointiympäristö. Simuloinnin tuloksena voitiin todeta, että kaupunkibussiliikenteessä on polttoaineenkulutuksessa huomattava säästöpotentiaali ja että polttoaineenkulutuksessa on suuret erot eri ajosykleiden välillä. Simuloinnit osoittivat, että optimaalisilla ajosykleillä polttoaineenkulutuksessa on saavutettavissa jopa 10–17 %:n säästö.

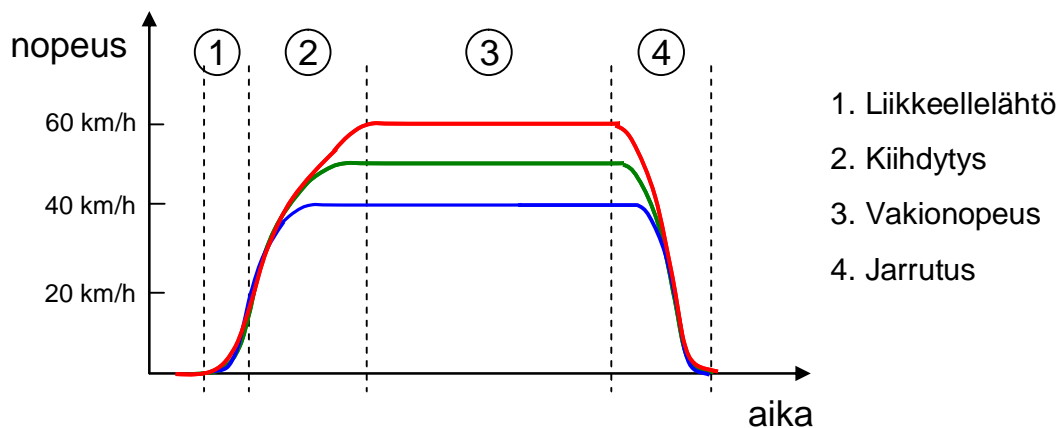
Ajo-opastimen simuloinnilla pystyttiin hyvin kehittämään suunniteltua laitetta. Simuloinnin heikkoutena oli kuitenkin eräiden oleellisten bussin ajamiseen vaikuttavien tekijöiden kuten liikennetilanteen huomiotta jättäminen.

5.2.5 Opastinjärjestelmän rajapinnat

Kuljettajan opastamiseksi polttoainetalouden ja aikataulussa pysymisen huomioiden ajo-opastin tarvitsee tietoja ajoneuvon liiketilasta, sijainnista reitillä ja aikataulussa pysymisestä. Ajoneuvon liiketila ja moottorin polttoaineenkulutus luetaan auton omasta CAN-väylästä käyttäen FMS-standardin mukaista rajapintaa. Tällöin ei tarvita erillistä instrumentointia suureiden mittaamiseen. Ajoneuvon sijainnin sekä pysäkkien paikannuksessa hyödynnetään GPS-satelliittiverkkoa ja -paikantimia. Näiden jatkuvasti mitattavien suureiden lisäksi opastin tarvitsee toimiakseen tiedon pysäkeistä ja aikataulusta sekä reitistä ja sen nopeusrajoituksia. Järjestelmään ladataan aikataulutiedostot, jotka sisältävät lähdön numeron, aikataulun mukaisen lähtöajan ja pysäkkien välisen ajoajan. Lisäksi syötetään pysäkit ja pysäkkien koordinaatit sekä nopeusrajoitukset tien osuuksilla. Nämä reitti-, pysäkki-, aikataulu- sekä nopeusrajoitustiedot syötetään vielä tässä vaiheessa manuaalisesti. Kaupallisessa versiossa tulee kuitenkin kiinnittää enemmän huomiota linjakohtaisen ohjelmoinnin automatisointiin työkuulumusten minimoimiseksi.

5.2.6 Opastuslogiikka

Opastuslogiikan kehittämiseksi kaupunkibussien ajotapahtuma yksittäisellä pysäkkivälillä jaettiin tarkastelua varten neljään eri vaiheeseen: 1. liikkeellelähtöön, 2. kiihdytykseen, 3. vakionopeuteen ja 4. jarrutukseen. Ideaalinen ajotapahtuma vaiheeseen on esitetty kuvassa 5.1. Polttoaineenkulutuksen kannalta merkittävin vaihe on kiihdyttäminen. Koska kiihdyttäminen vastaa merkittävintä osaa pysäkkien välillä tehdystä työstä, on kiihdyttäminen moottorin parhaalla hyötysuhteella polttoainetalouden kannalta tärkeää. Optimaalinen kiihdytys opastetaan kuljettajalle opastinlaitteen näyttöpäätteellä, joka on esitetty kuvassa 5.2. Liian vähäinen kiihdyttäminen muuttaa ylimmän indikaattorin taustan keltaiseksi ja teksti kehottaa lisäämään ”kaasua”. Liiallinen kiihdytys puolestaan muuttaa taustan punaiseksi ja kehottaa vähentämään ”kaasua”. Pysäkeiltä lähtöjen lisäksi myös kiihdytykset esimerkiksi liikennevaloista ja muista satunnaisista liikenteen aiheuttamista pysähdyksistä opastetaan kuljettajalle. Jarrutusvaihetta ei turvallisuussyistä opasteta.

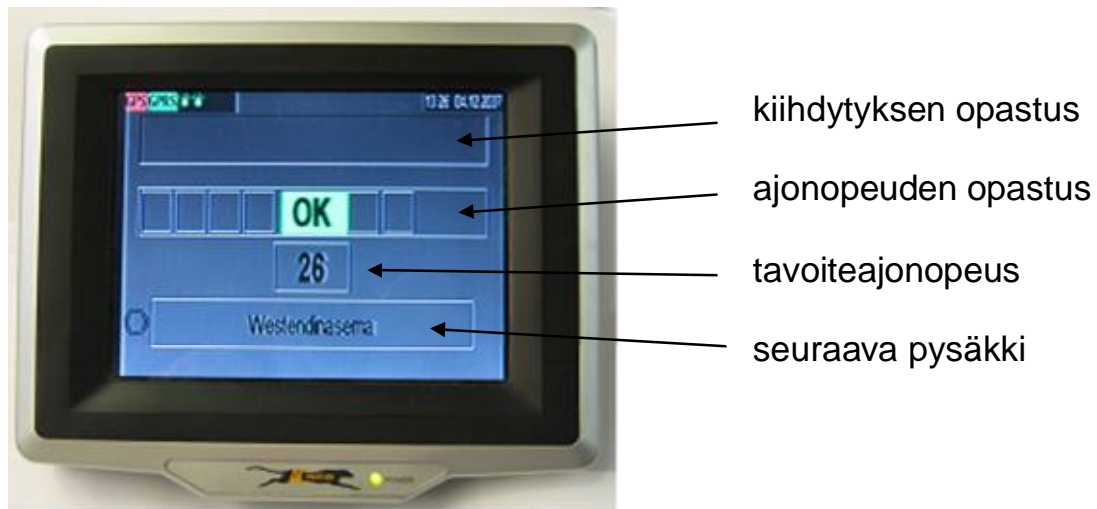


Kuva 5.1. Ideaalisia nopeusprofieja bussipysäkkivälille sekä pysäkkien välisen ajopahtuman jako neljään vaiheeseen.

Kiihdyttämisen ja taloudellisen ajamisen lisäksi ajo-opastin laskee jokaiselle pysäkkivälille tavoitenopeuden järjestelmään luettujen tietojen ja reitille määritettyjen pysäkkiaikataulujen perusteella. Tavoitenopeus määrätään siten, että se on mahdollisimman alhainen mutta riittää kuitenkin pitämään linjan hyvin aikataulussa. Jos aikataulusta ollaan jäljessä, ajo-opastin ei kuitenkaan nosta tavoitenopeutta yli tienosalla sallitun nopeusrajoituksen. Aikataulusta jäämisen suhteen ei suuria aikataulupoikkeamia yleensä pääse syntymään, koska ajo-opastin aloittaa opastamisen heti linjan alussa. Näin ollen linjan aikataulussa pitämiseen riittää ajonopeuden suhteellisen pieni hienosäätö.

Palvelutason kannalta muutaman minuutin myöhästymistä huomattavasti parempi asia on aikataulun edellä ajaminen. Edellä aikataulusta ajaminen rajoittuu opastimen avulla erityisen tehokkaasti laskemalla tavoitenopeutta. Tällöin käytävissä oleva ylimääräinen aika käytetään polttoainetalouden kannalta järkevästi, koska ajonopeuden laskiessa ajovastukset pienenevät. Kuvassa 5.1 on myös esitetty nopeusprofiileja eri ajonopeuksille. Jos aikataulusta ollaan edellä, niin opastin laskee tavoitenopeutta. Tällöin kuitenkin kiihdytys- ja jarrutusvaihe pysyvät muilta osin samoina.

Opastuslogiikan toimiminen edellyttää, että opastinlaite havaitsee automaattisesti reitille lähdön sekä pysäkillä saapumisen ja pysäkillä lähdön. Näiden tilanteiden automaattinen havainnointi asettaa haasteita järjestelmän toiminnalle. Koska lähdön merkitsemistä ei haluttu jättää kuljettajan merkinnän varaan ja muiden laitteiden hyödyntäminen ei tässä vaiheessa ollut mahdollista, kehitettiin liikkeellelähdön ja pysähdysten havaitseminen, joka perustuu tarkkaan GPS-tietoon sekä oikean aikataulun reitille lähdön kellonaikaan. Ongelmatilanteena usein kuitenkin on, että monilla päätepysäkeillä bussit kulkevat useaan kertaan varsinaisen lähtöpaikan ohi lähtemättä kuitenkaan vielä reitille. Tällainen tilanne on esimerkiksi päätepysäkillä saapuessa sekä lepotauoille mentäessä.



Kuva 5.2. Tarjousten perusteella valitun AC Sähköautot Oy:n toteuttama ajo-opastimen kuljettajan näyttöpäätte. Kuvanottohetkellä tavoitenopeus on 26 km/h ja laitteen toteama todellinen nopeus sallituissa rajoissa (OK).

Kuljettajan rajapinta on näyttötaulu, joka on esitetty kuvassa 5.2. Informaation välitys kuljettajalle pyritään pitämään mahdollisimman yksinkertaisena, ettei sen seuraamiseen tarvitsisi kiinnittää liiaksi huomiota. Kuljettajalle näytettävässä opastusnäytössä ylimpänä on kiihdytyksen opastus, toinen rivi on varattu ajonopeuden opastamiselle, kolmannella rivillä kerrotaan tavoitenopeus numeroina ja alimmalla rivillä on seuraavan pysäkin nimi. Poikkeama opastusnopeudesta esitetään keskellä sijaitsevan OK merkin molemmilla puolin sijaitsevilla väripalkeilla. Vihreä OK merkki näytetään vielä samanlaisesti ensimmäisten ”hienosäätö” palkkien syttyessä (sallittu toleranssi).

Opastinta käytettäessä jatkuvan aikataulujen tarkkailun tarve vähenee oleellisesti, koska aikataulujen hallinta on kiinteänä osana laitteen toimintalogiikkaa. Mikäli aikataulusta ollaan myöhässä, nostetaan opastusnopeutta korkeintaan nopeusrajoitukseen. Tällöin kuljettajalle ei synny kiusausta ajaa ylinopeutta aikataulusta jäämisen vuoksi. Myös tahattomat ylinopeudet vähenevät selvästi, koska kuljettajan ei tarvitse jatkuvasti verrata nopeusmittarin viisarin näyttämää tien nopeusrajoitukseen. Laite yksinkertaistettuna ilmoittaa vihreällä OK merkillä, että nopeus on riittävä.

5.2.7 Mittaustulosten analysointi

Ajo-opastimen vaikutusten analysoinnissa käytetty mittausdata on kerätty kesäkuusta 2008 lähtien. Ajo-opastinlaite tallentaa sekunnin välein noin 20 muuttujaa bussin liiketilasta sekä moottorin tilaa kuvaavista suureista. Lisäksi tallennetaan opastuksen tilaa, opastusnopeutta, ja opastuksen toteutumista kuvaavia suureita sekä sijaintitieto, nopeusrajoitus sekä ero aikatauluun.

Kuljettajien ajotapaa ja suoriutumista Jokeri-linjalla ennen opastimen käyttöönottoa ja sen jälkeen tarkastellaan seuraavien suureiden avulla:

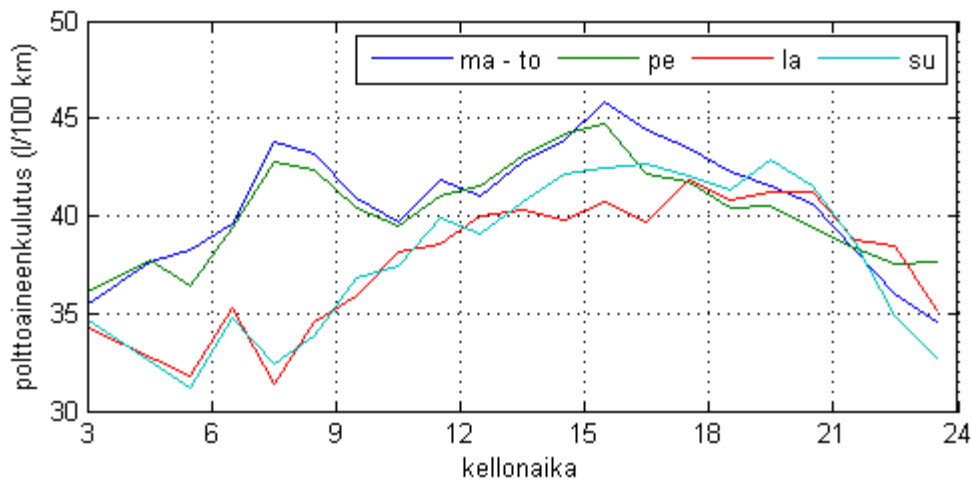
- polttoaineenkulutus,
- ylinopeuksien ajaminen ja
- aikataulussa pysyminen.

Kuljettajan suoriutumisen tarkastelu suoritetaan erikseen molemmille Jokeri-linjan suunnille. Kuljettajan suoriutumisen järkevää määrittämistä varten muodostetaan vertailuarvot, jotka huomioivat kuljettajasta riippumattomien tekijöiden vaikutuksen. Seuraavassa on kuvattu mittaustuloksista laskettujen vertailuarvojen muodostus kuljettajien suoriutumisen määrittämiseksi, yhteenveto kuljettajien suoriutumisesta Jokeri-linjalla sekä opastettujen kuljettajien suoriutuminen ennen ja jälkeen opastuksen kytkennän.

Polttoaineenkulutus

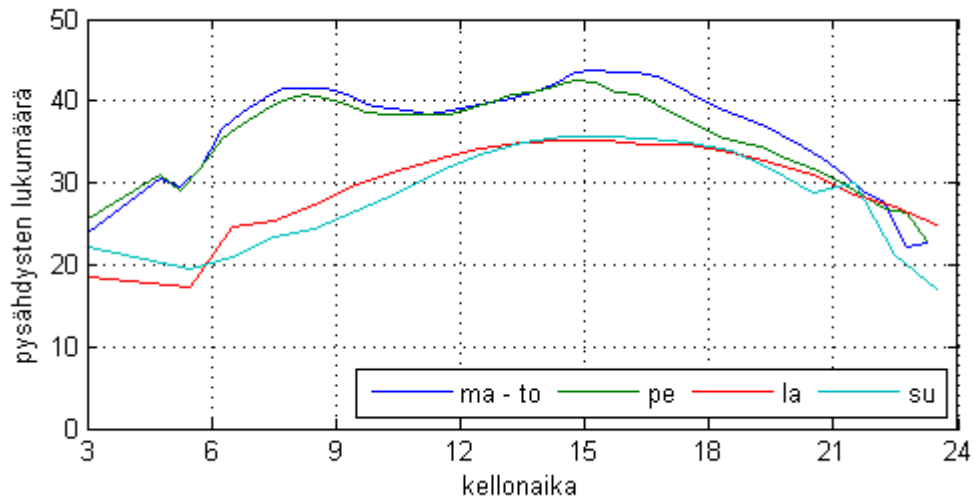
Kuljettajan suoriutumisen määrittämiseksi vertailuryhmään nähden tarvitaan vertailuryhmää edustava vertailuarvo. Kuljettajan toiminnasta riippumattomia polttoaineenkulutukseen vaikuttavia tekijöitä ovat mm. matkustajamäärä, mahdolliset liikenneuhkat sekä ulkoiset olosuhteet, kuten sää ja lämpötila. Näiden lisäksi kulutukseen vaikuttavat ajoneuvon ominaisuudet, kuten talvipintaisten renkaiden sekä talvilaatuisen dieselpolttonesteen käyttöönotto. Kaikkien näiden vaikutusten huomioimiseksi polttoaineenkulutuksen vertailuarvo muodostetaan kahdessa vaiheessa. Ensimmäiseksi määritetään polttoaineenkulutuksen riippuvuus vuorokauden ajasta eri viikonpäivinä. Tämän jälkeen lasketaan keskimääräinen polttoaineen kulutus tarkastellulla aikavälillä, jolloin vertailutasoa voidaan nostaa tai laskea päiväkohtaisesti olosuhteiden edellyttämällä tavalla.

Kuvassa 5.3 on esitetty keskimääräiset polttoaineenkulutuservot kellonajan funktiona viikon arkipäivinä sekä viikonlopun päivinä ja kuvassa 5.4 on esitetty linjalla tapahtuvat pysähdysten lukumäärä vuoron lähtöajan funktiona. Kuvista havaitaan, että kulutuksen ja pysähdysten määrän (matkustajien määrän) välillä on voimakas riippuvuus. Viikon arkipäivinä pysähdyksiä on jopa 30 % enemmän kuin viikonloppuna. Toisaalta viikon arkipäivien pysähdysten lukumäärää tarkasteltaessa havaitaan, että perjantai poikkeaa selvästi muista arkipäivistä. Varsinkin perjantai-iltapäivinä pysähdyksiä vuoron aikana on 5–10 % vähemmän kuin muina arkipäivinä. Tämän vuoksi päädyttiin muodostamaan perjantaille omat vertailuarvot niin kulutukselle kuin muillekin suureille.

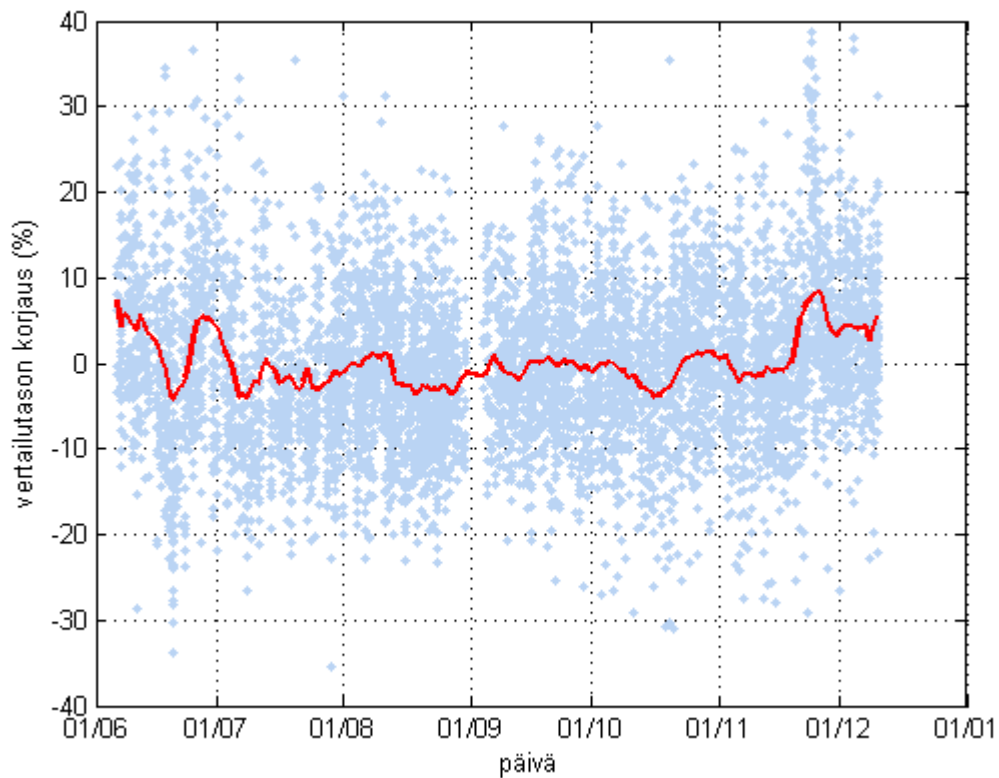


Kuva 5.3. Polttoaineenkulutus kellonajan funktiona viikon arkipäiville sekä viikonlopuille.

Vuorokauden ajan huomioinnin jälkeen polttoaineenkulutukselle määrätään olosuhteiden muutokset pidemmällä aikavälillä huomioiva vertailukäyrä. Tämän perusteella saadaan esitettyä päivän funktiona korjauskerroin, jolla huomioidaan olosuhteiden muutokset (esim. lumisade) sekä rengastuksen ja polttoainelaadun muutokset pidemmällä aikavälillä. Kuvassa 5.5 on esitetty yksittäisten polttoaineenkulutusmittausten poikkeamat vuorokauden ajan huomioivaan vertailuarvoon. Korjauskerroin on määrätty seitsemän päivän liukuvalla keskiarvolla yksittäisten päivien keskimääräiselle polttoaineenkulutuksen poikkeamalle. Korjauskertoimella avulla tietyn päivän polttoaineenkulutuksen vertailuarvoa voidaan nostaa tai laskea olosuhteiden mukaisesti. Esimerkiksi marraskuun lopulla esiintyneen ennätysellisen lumimyräkän kohdalla korjauskertoimella korotetaan vertailuarvoa jopa 8 %:lla.



Kuva 5.4. Pysähdysten lukumäärä vuoron lähtöajan funktiona viikon arkipäiville sekä viikonlopuille.



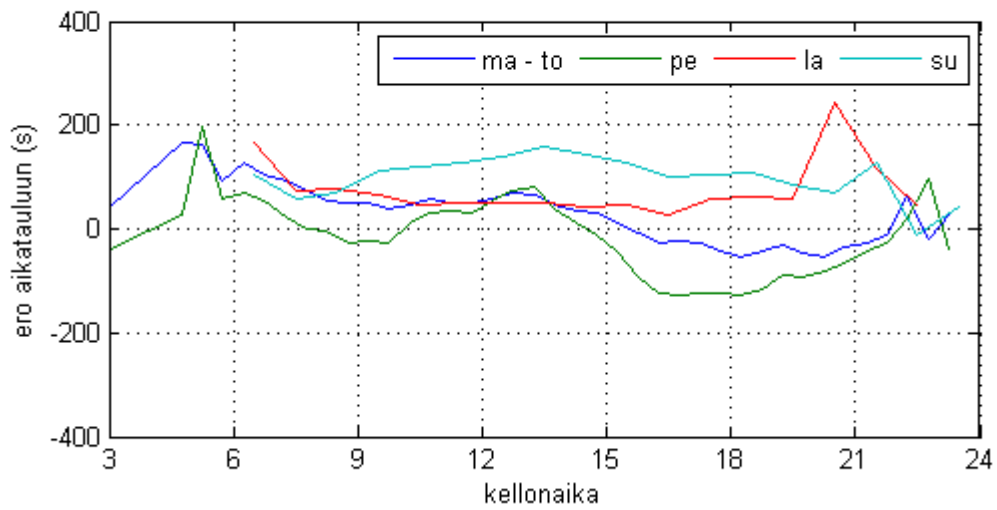
Kuva 5.5. Polttoaineenkulutusmittausten poikkeamat vuorokauden ajan huomioiviin vertailuarvoihin nähden sekä näiden perusteella määrätty korjauskerroin loppuvuoden 2008 aikana.

Aikataulussa pysyminen

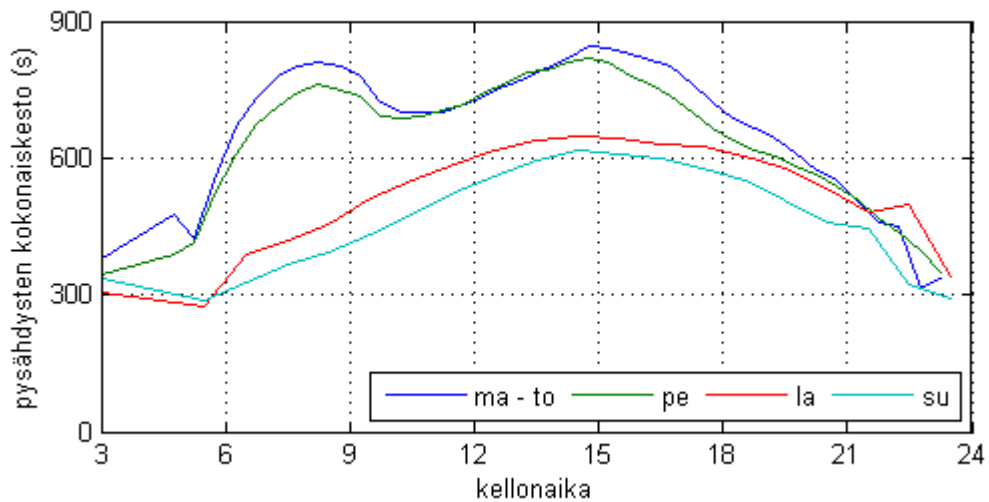
Aikataulussa pysymistä tarkastellaan suureella, joka ilmoittaa eron aikataulun mukaiseen kellonaikaan vuoron päätepysäkillä. Aikataulussa pysymiseen vaikuttavia tekijöitä ovat erityisesti matkustajamäärä, mahdolliset liikenneuhkat sekä poikkeukselliset sääolosuhteet. Aikataulussa pysymisen vertailuarvo määrätään kahdessa vaiheessa vastaavalla tavalla kuin polttoaineen kulutuksen tapauksessakin. Ensimmäiseksi lasketaan ero aikatauluun vuoron lähtöajan funktiona viikon arkipäivinä sekä viikonlopun päivinä. Tällöin pysähdysten lukumäärän ja pysähdysten keston vaihtelu saadaan huomioitua vertailuarvossa. Ero aikatauluun vuoron lähtöajan funktiona on esitetty kuvassa 5.6.

Ero aikatauluun tiedossa negatiivinen arvo tarkoittaa aikataulusta edellä olemista. Viikon arkipäivinä noin klo 15–22 vuorot ovat keskimäärin aikataulusta edellä (kuva 5.6). Erityisesti tämä korostuu perjantaisin, jolloin ollaan keskimäärin yli 100 s edellä aikataulusta. Tämä selittyy perjantain pienemmällä matkustajamäärällä, joka oli havaittavissa myös pienempänä pysähdysten lukumääränä. Pienemmästä matkustajamäärästä seuraa myös pienempi pysähdysten kokonaiskesto vuoron aikana. Keskimääräinen pysähdysten kokonaiskesto vuoron lähtöajan funktiona viikon arkipäiville sekä viikonlopulle on esitetty kuvassa 5.7. Havainto perjantain poikkeavuudesta suhteessa viikon muihin arkipäiviin (ma–to) vahvisti tarpeen muodostaa perjantaipäiville omat vertailuarvot niin polttoaineenkulutuksen kuin aikataulussa pysymisen määrittäville suureille.

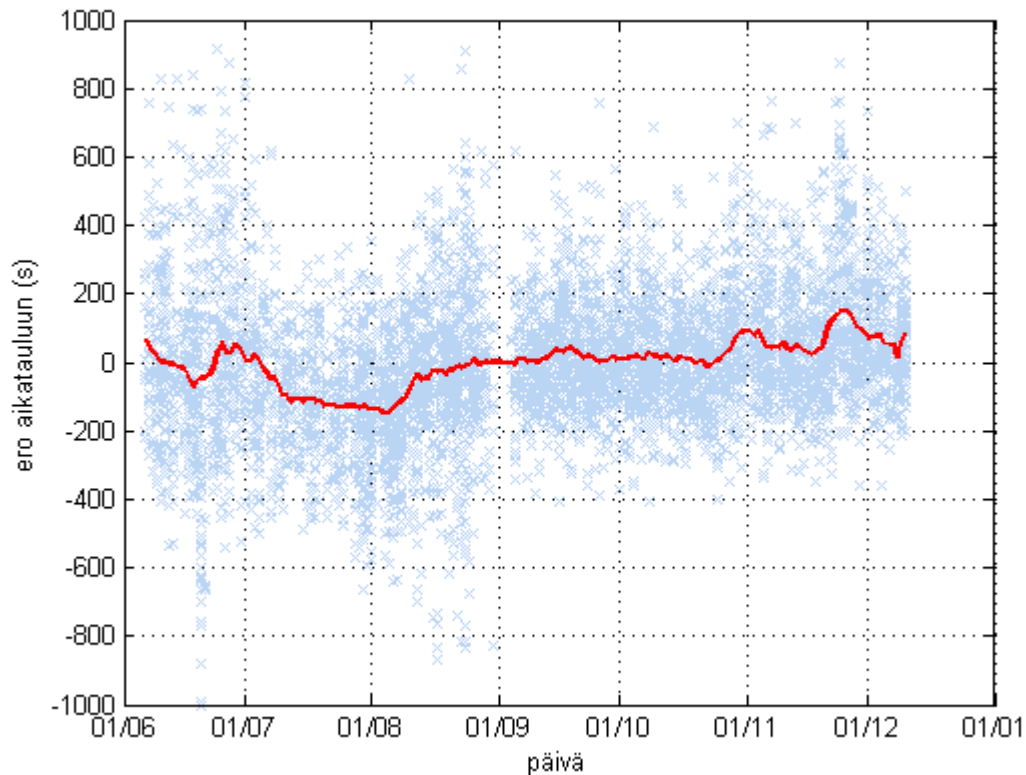
Toisessa vaiheessa määritetään sääolosuhteiden vaikutuksen huomioiva korjauskerroin. Kuvassa 5.8 on esitetty poikkeamat aikatauluun sekä näiden perusteella laskettu korjauskerroin loppuvuoden 2008 ajalle. Aikataulusta poikkeamisarvoissa on huomioitu vuorokauden ajan vaikutus ja korjauskerroin on määrätty laskemalla seitsemän päivän liuku keskiarvo päiväkohtaisille keskiarvoille. Kuvasta havaitaan, että hajonta aikataulusta poikkeamiselle on verrattain suurta. Tämä kuvastaa osaltaan tarvetta ajo-opastimen kaltaiselle laitteelle.



Kuva 5.6. Ero aikatauluun vuoron lähtöajan funktiona viikon arkipäiville sekä viikonlopulle.



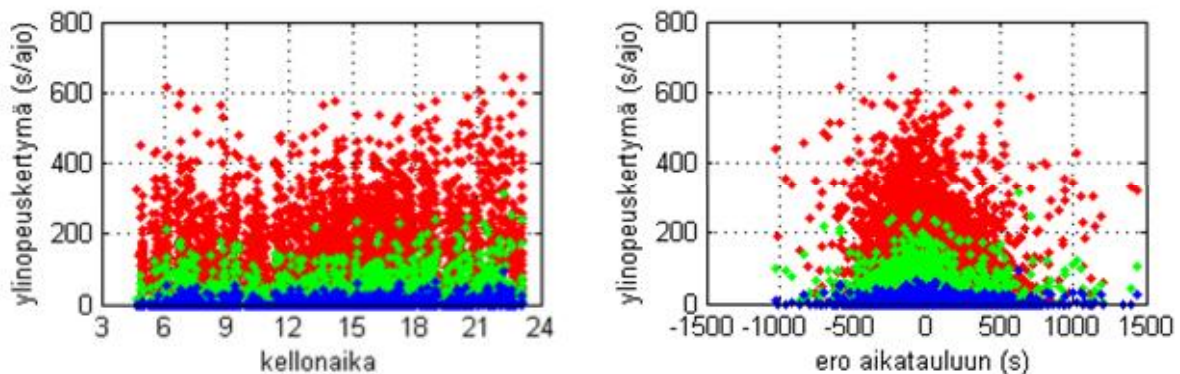
Kuva 5.7. Keskimääräinen pysähdysten kokonaiskesto vuoron lähtöajan funktiona viikon arkipäiville sekä viikonlopulle.



Kuva 5.8. Ero aikatauluun –data vuorokauden ajan huomioiviin vertailuarvoihin nähden sekä näiden perusteella määrätty korjauskerroin loppuvuoden 2008 aikana.

Ylinopeus

Tärkeä kuljettajan ajotapaa kuvaava suure on ylinopeuden kertymä vuoron aikana (s/vuoro). Ylinopeusdata käsitellään kuukausikohtaisesti. Kaikkien kuljettajien joukossa määrätään keskimääräinen ylinopeuskertymä jaoteltuna 10, 20 ja 30 km/h – ylinopeuksiin. Kuvassa 5.9 on esitetty ylinopeuskertymän riippuvuus vuorokauden ajasta sekä ylinopeuden ja aikataulussa pysymisen välinen yhteys. Kuvan vasemmanpuoleisesta kuvaajasta havaitaan, että ylinopeuskertymät pysyvät suhteellisen tasaisina kellonajan suhteen. Iltaa kohti kertymä hieman kasvaa ja vastaavasti iltaa kohti mentäessä vuorot ovat usein edellä aikataulustaan. Oikeanpuoleisessa kuvaajassa on yhdistettynä ylinopeuskertymän ja aikataulussa pysymisen kuvaava tieto. Jos ylinopeutta ajettaisiin sen vuoksi, että autot olisivat myöhässä aikataulusta, olisi kertymien painopisteen oltava selvästi positiivisella x-akselin puolella. Nyt painopiste on kuitenkin hieman negatiivisella puolella x-akselin suunnassa. Kuvat siis vahvistavat käsitystä siitä, että ylinopeuden ajaminen on enemmänkin kuljettajan ajotavan kuin olosuhteiden aiheuttamaa ja että suuri ylinopeuskertymä on pikemminkin osoitus aikataulusta edellä olemisesta myöhässä olemisen sijaan.



Kuva 5.9. Ylinopeuskertymän riippuvuus vuorokauden ajasta sekä aikataulussa pysymisestä: punainen yli 10 km/h, vihreä yli 20 km/h ja sininen yli 30 km/h.

5.2.8 Esimerkkejä kuljettajien suoriutumisesta

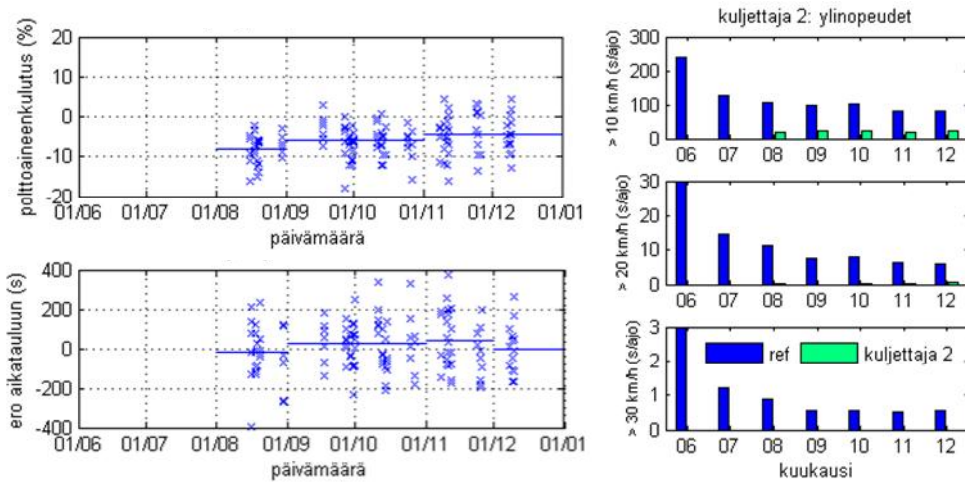
Esimerkkinä kuljettajien suoriutumisesta ja mittaustulosten analysoinnista on kolmen kuljettajan tulosten yhteenveto loppuvuoden 2008 ajalta. Tarkastellut kuljettajat on valittu edustaviksi esimerkeiksi analysoidun kuljettajien joukosta. Mukana on yksi kuljettaja, jolle opastin on kytketty päälle tarkastelujakson aikana. Kuvissa 5.10, 5.11 ja 5.12 on esitetty kuljettajien polttoaineenkulutus, aikataulussa pysyminen ja ylinopeuksien kertyminen suhteessa edellä kuvattuihin vertailuarvoihin. Polttoaineenkulutuksen ja aikataulussa pysymisen esittämissä kuvaajissa on yksittäisten mittaustulosten lisäksi esitetty kuukauden keskimääräinen arvo kuljettajan tason kehityksen seuraamiseksi. Ylinopeuskertymää esittämissä kuvaajissa on esitetty koko vertailujoukon keskimääräinen ylinopeuskertymä sekä tarkastellun kuljettajan ylinopeuskertymä.

Kuljettajan suoriutumista esittävät kuvat antavat hyvän estimaatin kuljettajan ajotavasta. Kuljettaja nro 2 ajaa vähän ylinopeutta suhteessa keskiarvoon ja on hyvin aikataulussa. Polttoaineen kulutus on rauhallisen ajotavan myötä selvästi keskimääräistä alhaisempi. Kuljettaja nro 7 puolestaan ajaa ylinopeutta keskimääräistä enemmän ja on yleensä aikataulusta edellä. Tällä ajotavalla myös polttoaineenkulutus on keskimääräistä korkeampi.

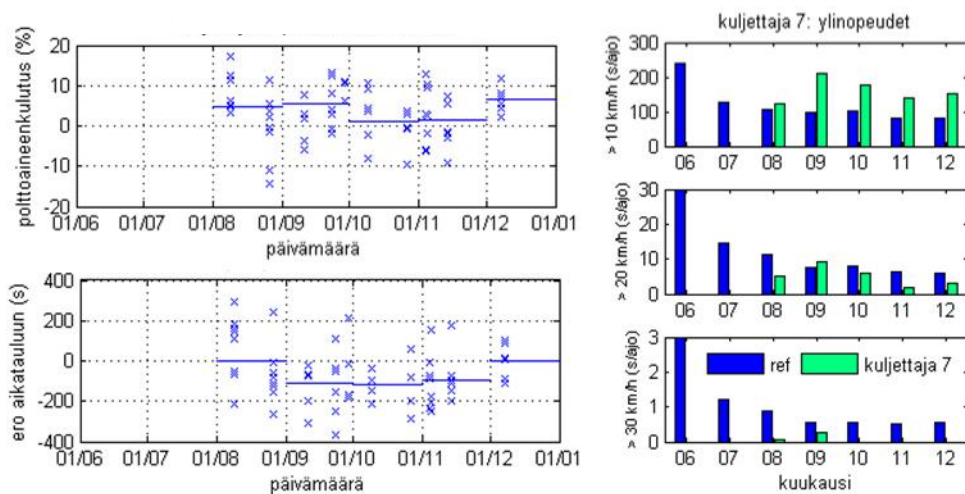
Opastetun kuljettajan nro 3 suoriutuminen on esitetty kuvassa 5.12. Opastin on kytketty toimintaan 22.9.2008. Kuvasta havaitaan, että kuljettaja ajaa jo lähtökohtaisesti alle vertailujoukon nollatason polttoaineenkulutuksen osalta, eikä opastimella ole polttoaineenkulutuksen osalta merkittävää vaikutusta. Vastaavasti ajo-opastin vaikutus aikataulussa pysymiseen on vähäinen. Ylinopeuskertymän kohdalla havaitaan, että opastimen kytkemisen jälkeen ylinopeuskertymä pienenee selvästi. On kuitenkin todettava, että tarkastellun kuljettajan otoksen suuruus ennen ja jälkeen opastimen kytkennän on pieni.

Opastettuja kuljettajia ja heidän mitattuja ajojaan on vielä hyvin vähän, joten johtopäätösten tekeminen opastimen toiminnasta ei ole vielä luotettavaa. Kevään 2009 aikana

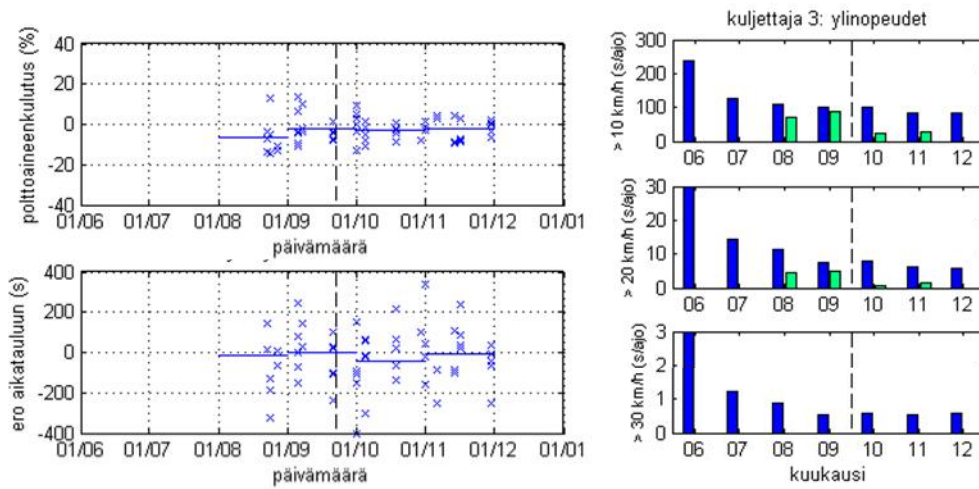
opastettuja kuljettajia ja heidän ajojen mittaustuloksia saadaan kerättyä lisää, jolloin tulosten tilastollinen analysointi on mahdollista.



Kuva 5.10. Yhteenveto kuljettajan nro 2 suoriutumisesta: polttoaineen kulutus, aikataulussa pysyminen sekä ylinopeuskertymä suhteessa vertailujoukkoon (tarkasteltu ajanjakso 1.6.2008–31.12.2008)

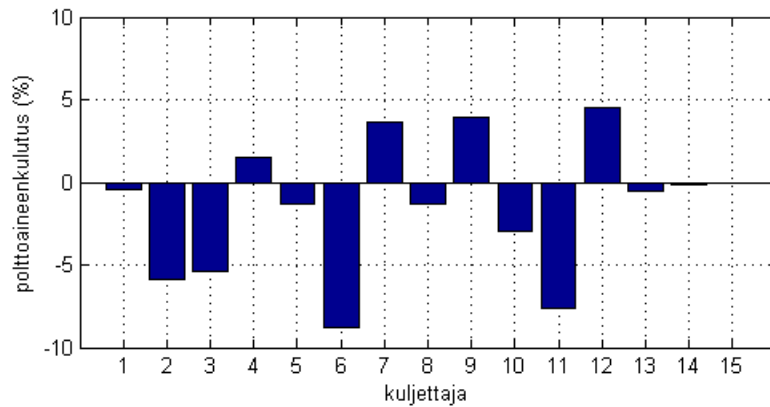


Kuva 5.11 Yhteenveto kuljettajan nro 7 suoriutumisesta: polttoaineen kulutus, aikataulussa pysyminen sekä ylinopeuskertymä suhteessa vertailujoukkoon (tarkasteltu ajanjakso 1.6.2008–31.12.2008)

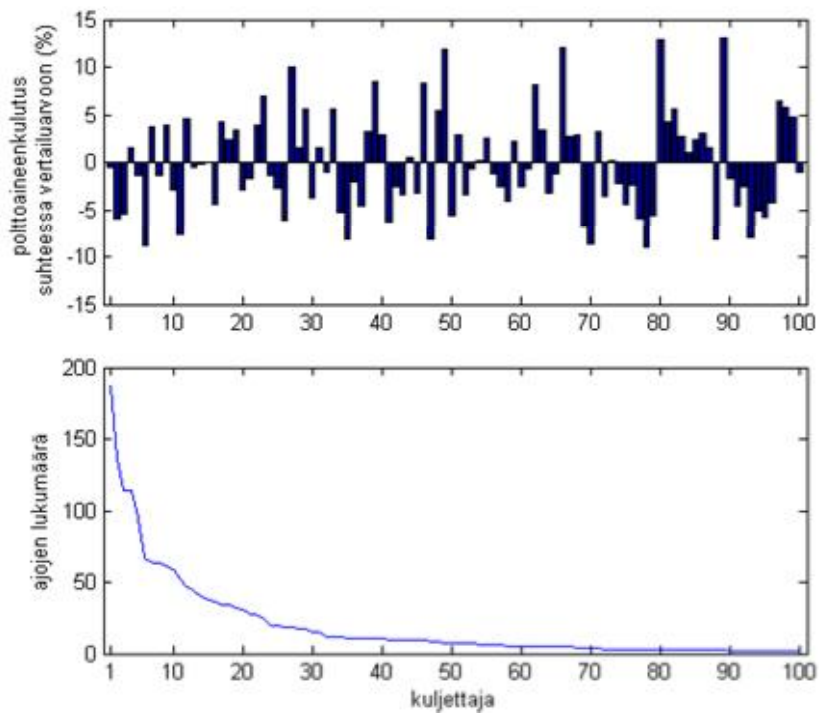


Kuva 5.12. Yhteenveto opastetun kuljettajan nro 3 suoriutumisesta: polttoaineen kulutus, aikataulussa pysyminen sekä ylinopeuskertymä suhteessa vertailujoukkoon (tarkasteltu ajanjakso 1.6.2008–31.12.2008). Opastin on kytketty toimintaan 22.9.2008, joka on merkitty katkoviivalla kuvaajiin

Kuljettajien ajotapaa kuvaavat suureet kuvissa 5.10 – 5.12 pysyvät ajan suhteen verraten tasaisina. Tämä on hyvä asia, koska se viittaa siihen, että edellä kuvatuilla analysointimenetelmillä saadaan mittaustuloksista selville kuljettajien ajotapa huomioimalla vertailuarvoissa mm. ruuhkan ja olosuhteiden vaikutukset. Toisaalta kuvat antavat vahvistusta siitä, että kuljettajien ajotavoissa on merkittäviä eroja. Tätä asiaa on esitetty myös kuvissa 5.13 ja 5.14, joissa on vertailtu kuljettajien ajosuorituksia suhteessa toisiinsa. Kuvassa 5.13 on esitetty viidentoista eniten ajaneen kuljettajan keskimääräinen polttoaineenkulutus suhteessa vertailuarvoon (kuljettajakohtaisesti ajojen lukumäärä vaihteli 38:sta 187:ään). Kuvassa 5.14 on esitetty sadan eniten ajaneen kuljettajan keskimääräinen polttoaineenkulutus suhteessa vertailuarvoon sekä kuljettajakohtainen otoksen suuruus (ajojen lukumäärä). Tarkastellussa joukossa polttoaineenkulutuksen osalta vaihteluväli kuljettajien kesken on noin -10:stä +10 %:iin suhteessa vertailuarvoon. Tämä osoittaa, että säästöpotentiaalia polttoaineenkulutuksen osalta selvästi on.



Kuva 5.13. Viidentoista eniten ajaneen kuljettajan polttoaineenkulutusarvot suhteessa vertailuarvoon. Kuljettajakohtaisen otoksen suuruus (ajojen lukumäärä) vaihteli 187:stä 38:aan



Kuva 5.14. Yläkuvassa sadan eniten ajaneen kuljettajan polttoaineenkulutusarvot suhteessa vertailuarvoon. Alakuvassa kuljettajakohtaisen otoksen suuruus (ajojen lukumäärä)

5.3 LIUKKAUDEN JA KUORMANPAINON AUTOMAATTINEN TUNNISTUS (OY, VTT)

5.3.1 Yleistä

Nykyaikainen ajoneuvo sisältää useita antureita, jotka mittaavat sen toimintatilasta useita asioita, kuten renkaiden pyörimisnopeuksia, moottorin toiminta-tilaa ja ajoneuvon sijaintia. Nämä tiedot pysyvät usein ajoneuvon sisäisinä tietoina eikä niitä välitetä eteenpäin. Tiedoille olisi kuitenkin käyttöä useisiin tarkoituksiin myös ajoneuvon ulko-
puolisissa tietojärjestelmissä. Niiden avulla voidaan ratkaista monet raskaan ajoneuvo-
kaluston logistiikkaan ja turvallisuuteen liittyvät kysymykset.

RASTU projektissa tutkittiin yhtenä alaprojektina tiestön liukkauden ja kuorman mas-
san automaattista tunnistamista. Kehitettyjen menetelmien perusajatuksena on saada
tien liukkaus ja ajoneuvoyhdistelmän massa selville raskaan ajoneuvon tietoväylässä
liikkuvan tiedon perusteella ilman erillistä anturointia normaalin ajon lomassa. Kehitet-
tyjen menetelmien avulla saatiin lupaavia tuloksia, jotka todensivat lähestymistavan
käyttökelpoisuuden. Menetelmät vaativat kuitenkin vielä monin osin jatkokehitystä.

Kuorman- ja liukkauden tunnistaminen haastava ongelma, joka todellisissa ajotilanteis-
sa vaatii laitteelta ja taustajärjestelmältä älykkäitä ominaisuuksia erilaisiin tilanteisiin ja
autojen ominaisuuksiin sopeutumiseksi. Digitaalisella signaalinkäsittelyllä mittasigna-
alista vaimennetaan hyötyinformaation havaitsemista haittaavia kohinakomponentteja ja
korostetaan haettavia ominaispiirteitä erilaisilla suodatusoperaatioilla. Hahmontunnistus
on tekoälyn paljon tutkittu osa-alue, jossa signaalista tunnistettavat hahmot mallinnetaan
joukolla sitä kuvaavia piirteitä ja tunnistetaan esimerkiksi tilastomatemattisilla luokit-
telumenetelmillä. Matemaattista mallintamista tarvitaan niiden yhtälöiden saamiseksi,
joilla kuorman ja liukkauden vaikutukset mitattaviin signaaleihin muodostetaan. Tyypil-
lisesti kehitetään parametrisia malleja, joiden parametrit voidaan adaptoida tilanteeseen
sopiviksi estimointiteoreettisilla menetelmillä, joita tässä yhteydessä voidaan kutsua
myös koneoppimisen menetelmiksi. Tiedonlouhinnassa laajaan kokeelliseen aineistoon
kohdistetaan lukuisia analyysialgoritmeja säännönmukaisuuksien havaitsemiseksi ja
mallintamiseksi.

5.3.2 Liukkaudentunnistus

Kehitetyn liukkausalgoritmin peruseriaate on tarkkailla vetävien pyörien ja etupyörien
välistä nopeuseroa suhteessa moottorin tuottamaan työntövoimaan. Näin saadaan liuk-
kausindeksi, joka on käänteinen kitkakertoimelle. Liukkaudentunnistusmenetelmällä
tuotettu tieto voidaan esimerkiksi esittää tarvittaessa kuljettajalle varoituksena liukkaas-
ta kelistä ja/tai välittää kelikeskukselle tiedoksi toimenpiteitä varten. Menetelmän etuna
on, että liukkaus havaitaan normaalissa ajossa ennen kuin tehdään voimakkaita jarrutuk-
sia. Tien pinnan liukkauden tunnistus on ongelmallista erityisesti silloin, kun halutaan
tunnistus jatkuvaksi. Nykyisin käytetyt tunnistusmenetelmät ovat kalliita, ja jatkuvan
mittauksen periaatteella toimivia laitteistoja on vähän käytössä. Jatkuvan mittauksen
avulla on mahdollista muodostaa kattava kokonaiskuva tiestön senhetkisestä tilasta.

RASTU-hankkeessa kehitetty jatkuvatoiminen liukkaudentunnistusmenetelmä osoitettiin toimivaksi usealla ajoneuvolla. Saatujen tulosten perusteella erittäin liukkaat alueet voidaan havaita suurella varmuudella: silloin kun liukkausalgoritmi päättää tienpinnan liukkaaksi, se sitä myös todennäköisesti on. Menetelmän tuottama liukkausindeksi kuitenkin sisältää epätoivottua satunnaisvaihtelua ja lisäksi suorituskyky vaihtelee muun muassa ajoneuvoyhdistelmän massan ja sekä renkaiden kunnan että tyypin suhteen.

Keskeisinä ratkaisemattomina ongelmina kehitetyn menetelmän toiminnassa ovat autojen erilaisuuden (rakenne, renkaat, kuormat) ja tiestön erilaisuuden huomioiminen. Käytännön ajotilanteissa ajoneuvoon kohdistuu jatkuvasti erilaisia ulkoisia voimia ja herähteitä, jotka vaikuttavat dynaamiseen painonjakoon akselien ja renkaiden välillä. Herähteitä ovat muun muassa tuulenpuuskat, töyssyt, urat, mutkat ja niin edelleen. Vedon jatkuessa, mutta vetoakselin renkaiden normaalivoimien muuttuessa liukkaudentunnistusmenetelmän herkkyys muuttuu. Dynaamisten liiketilojen ja muiden ulkoisten tekijöiden vaikutusta liukkausindeksiin tulisi kuitenkin edelleen selvittää ja algoritmin adaptiivisuutta kehittää. Itse menetelmän jatkokehittämistä varten olisikin tarpeellista hankkia ajoneuvoihin uudet suorituskykyiset ja varmatoimiset päätelaitteet, sekä asentaa kiihtyvyyssantureita liiketilan tunnistamiseksi.

Eri autojen havaintojen yhteismitallistaminen taustajärjestelmää hyväksikäyttäen vaatii selvitystä. Tämä kuitenkin vaatii suurempaa uusin päätelaittein varustettujen ajoneuvojen kantaa. Suuremman ajoneuvomäärän ja sitä kautta liukkaustiedon kattavuuden parannuttua järjestelmästä saatavaa teiden liukkaustietoa voitaisiin myös alkaa käyttää jo varoitustiedon informaationa.

5.3.3 Massan estimointi

Ajoneuvoyhdistelmän massan estimointimenetelmä perustuu ajoneuvon dynaamisen tilan muutosten syy- ja seuraussuhteiden havainnointiin energiaperiaatteen avulla. Peruseriaatteenä on selvittää, kuinka suuri osuus moottorin tekemästä työstä menee vierintä- ja ilmanvastuksen kumoamistyöhön, korkeudenmuutostyöhön ja ajoneuvon kiihdyttämistä varten tehtyyn työhön. Nämä osatekijät muodostavat erottamattoman kokonaisuuden, jossa kukin tekijä vaihtelee jatkuvasti ajan funktiona. Yksinkertaistetusti ajoneuvoyhdistelmän massa saadaan selville vertaamalla moottorin tekemää kiihdytystyötä ja sillä aikaansaatua nopeuden muutosta: mitä pienempi nopeuden kasvu on tehtyä työyksikköä kohden, sitä suurempi massa on. Tämän vuoksi vastusvoimien estimoinnissa tapahtuvat virheet heikentävät kiihdyttämistä varten tehdyn työn arviota ja sitä kautta aiheuttavat virhettä massaestimaattiin.

Raskaiden ajoneuvojen kohdalla on huomioitavaa, että estimoitavan massan vaihtelualue on suuri. Suomessa käytettävien 60 tonnin täysperävaunuyhdistelmien keskimääräinen omamassa on noin 24 tonnia, joten niiden hyötykuorman osuus on noin 36 tonnia. Vastaavasti kantavuudeltaan 42 tonnin puoliperävaunuyhdistelmän keskimääräinen omamassa on noin 14 tonnia hyötykuorman osuuden ollessa noin 28 tonnia. Täyteen lastatun yhdistelmän kokonaisuudessa on siis 2,5 – 3 -kertainen tyhjäan ajoneuvoon verrattuna. Linja-autoliikenteessä kuorman vaihtelu on tätä vähäisempää, mutta kuitenkin merkittävää. Etenkin näin suurella vaihteluvälillä on estimointimenetelmän jatkokehit-

tämiseksi ja sen toimivuuden varmentamiseksi eri olosuhteissa tärkeää kerätä mittaus-tietoa mahdollisimman kattavalla massajakaumalla. Luotettavan objektiivisen totuustie-don keräämiseksi tuleekin järjestää kontrolloitu testitapahtuma, jossa suoritetaan mittaus usealla eri kuormamassalla uusia päätelaitteita ja antureita käyttäen. Lisäksi projektiin osallistuville ajoneuvoille tulisi järjestää rutiininomainen punnitus operatiivisten ajota-pahtumien yhteydessä. Punnituspainon ja muiden mahdollisten arvioiden (esim. rahti-kirjaan perustuva massa-arvio) laadittavan kirjausmenettelyn tulee kyetä selkeästi erot-telemaan subjektiiviset ja objektiiviset arviot.

Raskaissa ajoneuvoissa rullausvastuksen ja renkaan tehonsiirtohäviön osuus on merkit-tävä. Tyypillisesti rullausvastukset muodostavat suurimman osan raskaiden ajoneuvojen kokonaisajovastuksista ajonopeuksissa alle 60–90 km/h. Rullausvastuksiin vaikuttavat suuresti sekä renkaan että tienpinnan ominaisuudet. Myös ajoneuvon massa vaikuttaa vierintävastukseen sitä lisäten. Muun muassa renkaiden materiaali, koko ja ilmanpaine ovat tärkeitä tekijöitä. Pehmeällä pinnoitteella vastus on suurempi kuin kovalla. Tilanne kuitenkin muuttuu nopeuden kasvaessa. Ilmanvastuksen osuus maanteillä liikkuvien raskaiden ajoneuvojen kokonaisajovastuksista onkin yli puolet nopeuksissa 60–90 km/h. Tästä johtuen raskas ajoneuvokalusto operoi hyvin vaihtelevissa toimintaympäristöissä, sillä suuri osa linja-autoista sekä kuorma- että pakettiautoista toimii kaupunkiolosuhteissa, joissa kuormitusprofiilit ovat täysin erilaisia kuin moottori- tai maanteillä operoi-villa ajoneuvoyhdistelmillä. Massan estimointimenetelmää tulisikin testata kattavasti erityyppisillä ajotapahtumilla, mikä edellyttää riittävän laajaa autokantaa, johon asenne-taan tarvittavat päätelaitteet ja anturit.

Tähän asti RASTU-projektissa kehitetyssä kuorman estimointimenetelmässä ilmanvas-tuksesta johtuvaa energiankulutusta on mallinnettu ainoastaan ajoneuvon nopeuden avulla. Tärkeämpi tieto kuitenkin on ajoneuvon nopeus ilman suhteen, sillä kohtalainen vastatuuli (keskimäärin 6 - 7 m/s) aiheuttaa 90 km/h maantienopeudessa 1,6-kertaisen vastusvoiman tyneen säähän verrattuna. Vastaavassa kohtalaisessa myötätuulessa kes-kimääräinen vastusvoima vähenee puoleen tyynen sään ilmanvastuksesta. Näin ollen joko suoraan edessä tai takaa puhaltavassa tuulessa ilmanvastuksessa tapahtuukin maan-tieolosuhteissa helposti 300 % vaihteluita huomioimatta puuskien paljon suurempia vaikutuksia. Lisäksi kookkaalla raskaalla ajoneuvokalustolla sivutuuli aiheuttaa huomata-vaa vastuksen kasvua. Esimerkiksi sivutuulelle herkimmillä täysperävaunulla jo 10 asteen sivutuuli aiheuttaa tyypillisesti 40 % suuremman ilmanvastuksen kuin suoraan edestäpäin puhaltava tuuli. Ilmanpaine ja lämpötila vaikuttavat myös suuresti ilmanvas-tukseen. Talvisella -25 °C pakkasella ilman tiheyden kasvusta johtuen sen aiheuttama vastusvoima on 22 % suurempi kuin kesäisenä +30 °C päivänä.

Mahdollisimman tarkan massaestimaatin saamiseksi säätila (tuulen nopeus, ilmanpaine, lämpötila) tulisi siis tuntea mahdollisimman hyvin. Tähän voidaan käyttää tiesääasemi-en ja muiden säähavaintopisteiden tuottamaa mittaus-tietoa. Luonnontuuli on kuitenkin äärimmäisen monimutkainen virtausilmiö, jossa virtauksen nopeus ja suunta voivat vaihdella huomattavasti lyhyen ajan sisällä ja verrattain lyhyellä matkalla. Tuulen voi-makkuuteen ja suuntaan vaikuttavat suuresti maaston muodot, rakennukset ja metsien sekä avoimien alueiden vaihtelut. Tuulen vaikutukset korostuvat avoimilla paikoilla kulkevilla pengerryillä teillä, silloilla ja aukeiden reuna-alueilla. Käytännössä sisä-maassa 10 minuutin yli keskiarvoistettu tuuli on suurimmillaan hyvin avoimilla tai kor-

keilla paikoilla 14–20 m/s eli kovaa tuulta. Puuskatuulet ovat kuitenkin tyypillisesti 1,6–1,8-kertaisia tähän 10 minuutin keskituulen nopeuteen nähden.

Tuulen luonteesta johtuen ainakin osa tutkimuksessa käytettävistä ajoneuvoista tulisi varustaa ilmannopeutta mittaavalla anturilla kuten esimerkiksi anemometrillä tai Pitotputken ja staattisen ilmanpainemittarin yhdistelmällä. Jälkimmäisen avulla myös ilman tiheyteen vaikuttava staattinen paine saadaan selville. Näiden lisäksi kyseiset ajoneuvot tulisi myös varustaa riittävän pienen aikavakion omaavalla elektronisella lämpömittarilla. Anturien optimaalinen sijoittaminen ajoneuvoihin on osaltaan haasteellinen tehtävä. Vertaamalla ajoneuvon kokemia olosuhteita lähimpien sääasemien mittaustietoihin on mahdollista selvittää, millä tarkkuudella tiesääasemien tiedoilla voidaan korvata ajoneuvokohtainen anturointi. Näiden tietojen pohjalta massan estimointimenetelmää voidaan myös pyrkiä kehittämään toimimaan ilman ulkoisia olosuhdetietoja (lisäanturit, sääasemat) pelkän ajoneuvotietoväylän ja korkeustiedon varassa. Kehitettävä menetelmä voisi esimerkiksi yksinkertaisimmillaan automaattisesti havaita ja hylätä tuulenuuskan aikana saadun mittaustiedon hahmontunnistusmenetelmien avulla. Hahmontunnistusmenetelmiä tulee kehittää laajemminkin havaitsemaan ja hylkäämään ne olosuhteet, joissa käytetyn menetelmän premissit eivät ole voimassa.

Raskaiden ajoneuvojen suuresta massasta johtuen myös niiden vaatima korkeudenmuutostyö on merkittävä etenkin suhteessa käytettävissä olevaan moottorin tekemään työhön. RASTU-projektissa kehitetty menetelmä määrittää korkeuden muutokset GPS-vastaanottimen avulla. Sen tarjoama korkeustieto on kuitenkin tarkkuudeltaan vaihtelevaa riippuen havaittujen satelliittien lukumäärästä ja parhaimmillaankin melko epätarkkaa. Ajoneuvon asennettavien kiihtyvyyssanturien avulla pienet lyhyellä aikavälillä tapahtuvat korkeuden muutokset voidaan mitata luotettavammin ja näin parantaa massaestimaattia.

5.3.4 Järjestelmän komponentit

Tiedonkeruulaite

Liukkaus- ja massaestimaattien tarvitseman tiedon mittaamiseksi ajoneuvot tulee varustaa tiedonkeruulaitteilla, jotka mittaavat tarvittavat suureet niin ajoneuvon tietoväylältä kuin erikseen asennettavilta antureilta. Tiedonkeruulaitteet suorittavat datan esikäsitteilyn ja välityksen taustajärjestelmään.

Ajoneuvokäyttöön soveltuvien tiedonkeruulaitteiden teknologia on hyvin kehittyntä ja tarvittavan kaltaisia laitteita on saatavilla kaupallisesti. Laitteiden valinnassa tulee kuitenkin kiinnittää erityistä huomiota tiedon reaaliaikaisen käsittelyn vaatimaan suorituskyvyn varmistamiseen. Toteutettavassa järjestelmässä ajoneuvossa mitataan hyvin monia tietoja eri lähteistä. (Lopullista mitattavien suureiden määrää ei vielä tiedetä, mutta kyseessä on useita kymmeniä.) Näiden tietojen käsittelyn mahdollistamiseksi tiedonkeruulaitteen tulee erityisesti mahdollistaa kunkin mitatun tiedon tarkan syntyajanhetken määrittäminen ja eri tietojen synkronoiminen keskenään. Lisäksi koska osa mittaustuloksista saadaan vaihtelevin aikaväleihin (esim. moottorin kierrosluku), tulee tiedonkeruulaitteen kyetä reaaliajassa uudelleen näytteistämään tämä epätasavälisesti näytteistetty data tasa-

välein jatkokäsittelyn mahdollistamiseksi. Samanaikaisesti laitteen tulee tiedonsiirtoyhteytensä kautta kyetä lähettämään prosessoimiaan tietoja, vastaanottamaan tietoa siihen reagoiden sekä kommunikoidaan kuljettajan kanssa kautta ilman, että aikakriittiseen tiedonkäsittelyprosessiin syntyy katkoksia.

Käytännön ongelmana ajoneuvon tietoväyliin perustuvassa menetelmässä ovat ajoneuvokohtaiset erot. Muun muassa valmistajasta, valmistusajankohdasta ja varustelutasosta riippuen tietoväylän kautta on eri autoissa saatavilla eri tietoja. Päätelaitteeseen tuleekin kehittää menetelmä, jonka avulla se kykenee ohjelmallisesti tunnistamaan mitkä kyseisen ajoneuvon tarjoamista tiedoista ovat tarpeen, jotta vältetään erityisen ongelmalliseksi havaittu ihmisten suorittama asetusten laatiminen. Tieto valituista tiedoista tulee välittää taustajärjestelmälle ajoneuvojen välisen vertailun mahdollistamiseksi. Usean tietolähteen ollessa tarjolla aluksi voidaan pyrkiä valitsemaan automaattisesti luotettavin tietolähde halutun suureen mittaamiseksi. Myöhemmässä kehitysvaiheessa pyritään fuusioimaan eri lähteistä saatavilla olevat tiedot parantaen mitattavan suureen luotettavuutta.

Taustajärjestelmä

Oleellinen osa niin liukkauden kuin massan tunnistusta on etätiedonsiirtoyhteyden takana sijaitseva taustajärjestelmä, joka ylläpitää kokonaiskuvaa. Sen tärkein tehtävä on fuusoida tuotettu tieto sekä ajallisesti että paikallisesti ja tarjota keskitetty päästy tähän tietoon. Taustajärjestelmän tulee ylläpitää tiestön kokonaisliukkaustilannetta yksittäisten ajoneuvojen tuottamien tietojen pohjalta, koostaa tarvittavat tiedot muista ulkopuolisista tietolähteistä kuten tiesääsemistä (mm. tuuli, sateet) ja suorittaa analyysejä eri ajoneuvojen tuottaman tiedon yhteismitallistamiseksi. Tiedon yhteismitallistaminen ja tarvittavat tiedonlähteet ovat yhä osin avoimia kysymyksiä, johon tutkimusprojektin aikana on tarkoitus kehittää vastaukset.

Tutkimushankkeen aikana taustajärjestelmä myös mahdollistaa nopean menetelmäkehityksen tarjoten pääsyn suureen datamäärään kehitettävien algoritmien toiminnan varmistamiseksi. Yksi tärkeä osa taustajärjestelmän tietojen hyväksikäyttöä ovat erilaiset näkymät sen sisältämään tietoon, kuten esimerkiksi graafiset visualisaatiot sekä tietojen yhteenvedot ja vertailut, mitä varten tulee kehittää tarvittavat analyysimenetelmät ja niiden käyttöliittymät. Suuren tietomäärän johdosta taustajärjestelmään tulee myös kehittää kiinnostavien tapausten (esim. tyypilliset tai poikkeavat) automaattinen tunnistusmenettely.

Tietojen yhteensitomisessa olisi mahdollista hyödyntää kansallista tie- ja katutietojärjestelmä Digiroadia. Digiroad-tietojärjestelmä on tähän mennessä kattavin Suomen tiestöä kuvaava tietokanta, joka tarjoaa muun muassa tietoa tien sijainnista, päällysteestä, nopeusrajoituksista, silloista, tunneleista ja bussipysäkeistä. Lisäksi se sisältää tiedot sallitusta käyttöajasta, kääntymis- ja ajokielloista sekä kelirikko-, leveys-, korkeus- ja painorajoituksista. Tietomäärän tarjoamat mahdollisuudet ovat laajat. Sen avulla voitaisiin esimerkiksi tunnistaa paremmin siltojen ja tunneleiden kohdalla tapahtuvat liukkauden ja tuulen nopeuden muutokset. Lisäksi voitaisiin muun muassa hyödyntää tietoa tien korkeudesta massan estimoinnin tarkkuuden parantamiseksi.

Menetelmien yhdistäminen

Projektin lopullisena tavoitteena sekä liukkauden että massan estimoinnissa on kehittää holistinen lähestymistapa, jossa pyritään luomaan yksi matemaattisesti yhtenäinen menetelmä, joka estimoii sekä massan että liukkauden samanaikaisesti huomioiden niiden väliset riippuvuudet. Sekä liukkauden että massan estimoinnissa on samankaltaisia piirteitä ja ne molemmat vaikuttavat toisiinsa: liukkaus kuluttaa moottorin tekemästä työstä oman osansa aiheuttaen virhettä massaestimaattiin. Vastaavasti massa vaikuttaa renkaiden pitoon aiheuttaen muutoksia liukkauden määrittämiseen. Tästä syystä yhdistetystä estimoinnista on odotettavissa selkeää hyötyä.

Menetelmiä jatkokehitettäessä tulee pyrkiä adaptiivisiin ratkaisuihin, jotka pystyvät huomioimaan jatkuvasti muuttuvat olosuhteet. Tätä varten tulee etsiä menetelmät, jotka parhaiten soveltuvat menetelmissä tarvittavien muuttuvien tuntemattomien parametrien määrittämiseen. Tilastomatematisista menetelmistä jatkokehityksessä tulisi potentiaalisimpana ehdokkaana testata Kalman-suodattimen soveltuvuus. Kalman-suodatin on erittäin tehokas rekursiivinen suodatin, joka estimoii dynaamisen systeemin tilaa kohinaisesta mittausdatasta. Kalman-suodattimen vaihtoehtona voidaan myös usein käyttää kehittyneempää partikkelisuodatinta, joka on päivitettävä menetelmä Bayesin-mallin piiloparametrien estimoinniseksi. Partikkelisuodattimen etuna Kalman-suodattimeen nähden on se, että riittävällä näytemäärällä sen antamat tulokset lähestyvät teoreettisesti parasta mahdollista Bayes-estimaattia.

Ympäristön muuttuviin oloihin automaattisesti reagoivan järjestelmän kehittämiseksi tulee suorittaa riittävä määrä tarkkaan suunniteltuja testiajoja tunnetuissa olosuhteissa (liukkaus, massa, sääolot) eri ajoneuvoilla. Projektin aikana vastaavat testiajot tulee toistaa eri olosuhteissa (lämpötila, tuulen nopeus). Näin saadaan mahdollisimman kattava objektiivinen aineisto, joka on hyvin tärkeä koneoppimisen menetelmien kehittämiseksi ja niiden toiminnan oikeellisuuden varmistamiseksi. Ilman hyvin luotettavaa vertailutietoa (ajoneuvon punnittu massa, kitkamittarilla mitattu liukkaus) menetelmien tuottamien estimaattien tarkkuudesta ei saada riittäviä takeita.

Menetelmien yhdistämistä voidaan suorittaa myös laajemmin. Yhdistelmien vetoautoissa ja linja-autoissa on usein käytössä lukuisia ajonhallintalaitteita, kuten vetoluistonestoa. Liukkaudentunnistusjärjestelmän kehityksessä onkin syytä pyrkiä hyödyntämään myös näiden järjestelmien tuottama tieto osana kokonaiskuvaa. Haasteena on hallita eri laitteiden käyttämät väylät, standardit, valmistaja ja yksilökohtaiset (tuotantoajankoh- ta/varustelu) erot.

Kehitettävien tieto- ja viestintäteknologisten menetelmien lopullisen muodon tarkentuessa voidaan tarkemmin vastata yhä tarkentuviin kysymyksiin. Voidaan tutkia esimerkiksi sitä, mihin mikäkin laskennan osa on optimaalisinta sijoittaa, jotta saavutetaan haluttu kompromissi muun muassa päätelaitteen ja taustajärjestelmän välillä tarvittavan tiedonsiirron muodon ja määrän, järjestelmän tosiaikaisuuden, päätelaitteiden monimutkaisuuden, kokonaisuuden hallittavuuden välillä. Voidaan tarkastella järjestelmäarkkitehtuurin skaalautuvuutta ajoneuvojen lukumäärään ja tutkia laskentakuorman dynaamisista balansointia halutun palvelun laadun takaamiseksi.

Kun järjestelmän avulla kyetään tuottamaan riittävän tarkkaa jalostettua tietoa, voidaan tutkia sen hyödyntämistä muissa yhteyksissä. Esimerkiksi ajoneuvon ajotapahtuman aikaisen kokonaismassa ja tuulioloista johtuva ilmanvastuksen taso voidaan huomioida laadittaessa kuljettajakohtaisia ajotapa- ja polttoaineenkulutusraportteja. Mitattavien tietojen avulla voidaan myös tutkia esimerkiksi huollon tarpeen määrittämistä. Tästä esimerkkinä voidaan mainita renkaiden kunnan ja ilmanpaineiden muutosten havainnointi polttoaineen kulutus- ja liukkaustason sekä vierintävastustietojen avulla. Riippuen asennettavien kiihtyvyyssanturien lukumäärästä ja sijainnista voidaan niiden avulla saada kattavaa tietoa ajoneuvon käytöksestä esimerkiksi sivuttaisvakauden osalta.

5.4 YHTEENVETO

Ajo-opastin, automaattinen kuormantunnistus ja automaattinen liukkaudentunnistus osoittautuivat kaikki pilottikokeilujen perusteella potentiaalisiksi kehityskohteiksi jatkossa. Periaatteiden toimivuus saatiin todistettua riittävällä tasolla jatkosuunnitelmien tekemiseksi. Projektien aikana lisääntyi käsitys erilaisten IT-järjestelmien hyödyntämismahdollisuuksista ajoneuvojen käytön energiatehokkuuden, palvelutason parantamisen ja turvallisuuden osalta. Kehitettyjä menetelmiä tullaan soveltamaan jatkoprojekteissa ja niille kaupallinen hyödyntäminen nähdään mahdolliseksi jo lähitulevaisuudessa.

6 LINJA-AUTOJEN LIIKENNÖINNIN OPTIMOINTI

Vastuutaho: VTT

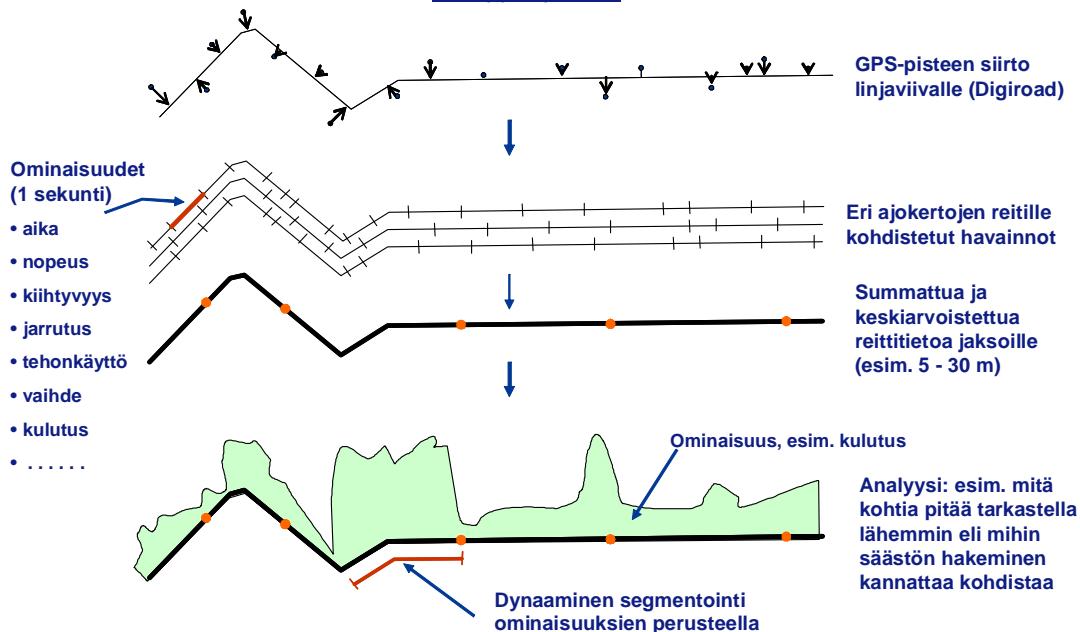
Teksti: Kari Mäkelä & Ari Sirkiä

Tavoitteena oli liikennöinnin taloudellisuuden ja tehokkuuden lisääminen, liikennöinnin laadun parantaminen ja liikenteen nopeuttaminen. Tavoitteiden toteutuessa saadaan säästöjä liikennöintikustannuksissa, kaluston käyttö on tehokkaampaa, linjan ajojaksojen liikennöinnin vaihtelu pienenee, mikä puolestaan parantaa liikennöinnin täsmällisyyttä ja joukkoliikenteen käyttö helpottuu. Lisäksi energiankulutuksen vähentyessä liikenteen ympäristökuormitus vähenee ja liikenneturvallisuus paranee.

VTT:n tämän osaprojektin työ keskittyi ajo-opastinlaitteen logiikan jatkokehittämiseen tiedonkeruusta saatavan lisäinformaation perusteella siten, että laite kuljettajaa opastessaan ottaa paremmin huomioon linjakohtaiset ominaisuudet opastimesta saatavan hyödyn optimoimiseksi. Tärkeätä on, että linjalta saadaan mahdollisimman yksityiskohtaista tietoa bussin ajodynamiikan muutoksista sekä energian tarpeesta ja käytöstä reitin eri osissa. Kerättävän aineiston perusteella muodostetaan reiteistä perustiedot ajo- ja matka-aikojen, sekä autokiertojen osalta. Edellä mainittujen tavoitteiden saavuttamiseksi tarvitaan työkaluja, joilla saatavaa suurta datamassaa voidaan käsitellä ja analysoida joustavasti. Aineistojen käsittelymenettelyt saatiin joustaviksi hyödyntämällä paikkatietojärjestelmien laajoja ominaisuuksia.

Linja-autojen liikennöinnin optimointi

Analyysityökalu



Kuva 6.1. Analyysityökalun eri osiot.

Ajo-opastimella kerätty aineisto on osoittautunut laadullisesti hyväksi. Kehitetyllä työkalulla (kuva 6.1) on käsitelty Jokeri-linjan (550) noin kuukauden aineisto. Laajempaa analyysiä ei ollut mielekästä tehdä tällä työkalulla ennen kuin opastus saatiin toimimaan. Liikennöinnin optimointiin kuuluvaa työtä jatkettiin "Linja-auton ajo-opastin" nimisessä alahankkeessa vuoden 2008 osalta.

7 KULJETUSALAN ENERGIATEHOKKUUDEN HALLINTA- JA KANNUSTINJÄRJESTELMÄT

Vastuutaho: TTY tiedonhallinnan ja logistiikan laitos

Teksti: Heikki Liimatainen

7.1 YLEISTÄ

Tampereen teknillisen yliopiston tiedonhallinnan ja logistiikan laitoksen osahankkeen tavoitteena oli kehittää seurantajärjestelmistä saatavan tiedon hyödyntämistä kuljettajien kannustamisessa taloudelliseen ajotapaan ja hyviin työsuorituksiin. Osahankkeesta on

julkaistu myös erillinen loppuraportti (Liimatainen, Rauhamäki, Liedes, 2009: Kuljetusalan energiatehokkuuden hallinta- ja kannustinjärjestelmät. Tutkimusraportti 74. Tampereen teknillinen yliopisto. Tiedonhallinnan ja logistiikan laitos. Liikenne- ja kuljetusjärjestelmät.).

Kannustinjärjestelmän kehitystyötä tehtiin tutkimuksen puitteissa Tampereen kaupungin liikennelaitoksessa (TKL) ja Transpoint Oy:ssä. Pääkohdeyritys oli TKL, jossa kehitettiin toimiva olosuhteet huomioon ottava kuljettajakohtainen polttoaineenkulutuksen seurantarjestelmä ja periaatteet laajempaan kuljettajien kannustinjärjestelmään. Transpoint Oy:ssä selvitettiin kannustinjärjestelmän tarpeita ja erityispiirteitä kuorma-autokuljetusten näkökulmasta ja luotiin kannustinjärjestelmän periaatteet, joiden pohjalta yrityksessä on tarkoitus aloittaa pilotointi vuoden 2009 alussa.

7.2 TALOUDELLISEEN AJOTAPAAN KANNUSTAMINEN

Yksi vaikuttavimmista ja myös kustannustehokkaimmista keinoista polttoaineenkulutuksen pienentämiseksi on kuljettajien kouluttaminen ja kannustaminen taloudelliseen ajotapaan. Raskaan ajoneuvon polttoaineenkulutus voi vaihdella jopa yli 30 % kuljettajan ajotavasta riippuen. Taloudellisen ajotavan koulutukset, kuljettajakohtainen polttoaineenkulutuksen seuranta ja palautteen antaminen ovat keinoja ohjata kuljettajia taloudelliseen ajotapaan.

Ajotapakoulutukset ovatkin arkipäivää monissa kuljetusyhteisöissä ja koulutuksien on todettu useissa tutkimuksissa alentavan kuljettajien polttoaineenkulutusta. Lyhyellä aikavälillä kulutus voi alentua jopa 10 %, mutta pitkällä aikavälillä koulutusten vaikutusten on todettu pienenevän ja asettuvan 2–5 prosentin tasolle, ellei kulutusta seurata aktiivisesti koulutuksen jälkeen. Säännöllisellä seurannalla ja palautteen antamisella koulutuksen vaikutuksia voidaan parantaa myös pitkällä aikavälillä. Esimerkiksi reaaliaikaisen kulutusnäytön asentamisella kuljettajan nähtävillä voidaan pitkän aikavälin säästöjä edelleen parantaa 2 prosentilla. Palaute voi olla myös esimerkiksi kuljettajan esimiehen aktiivista opastusta. Palautetta voidaan antaa myös rahallisten palkkioiden, tunnustusten tai tavarapalkintojen muodossa. Koulutusten, seurannan ja palautteen muodostamasta kokonaisuudesta voidaan käyttää nimitystä kuljettajien kannustinjärjestelmä.

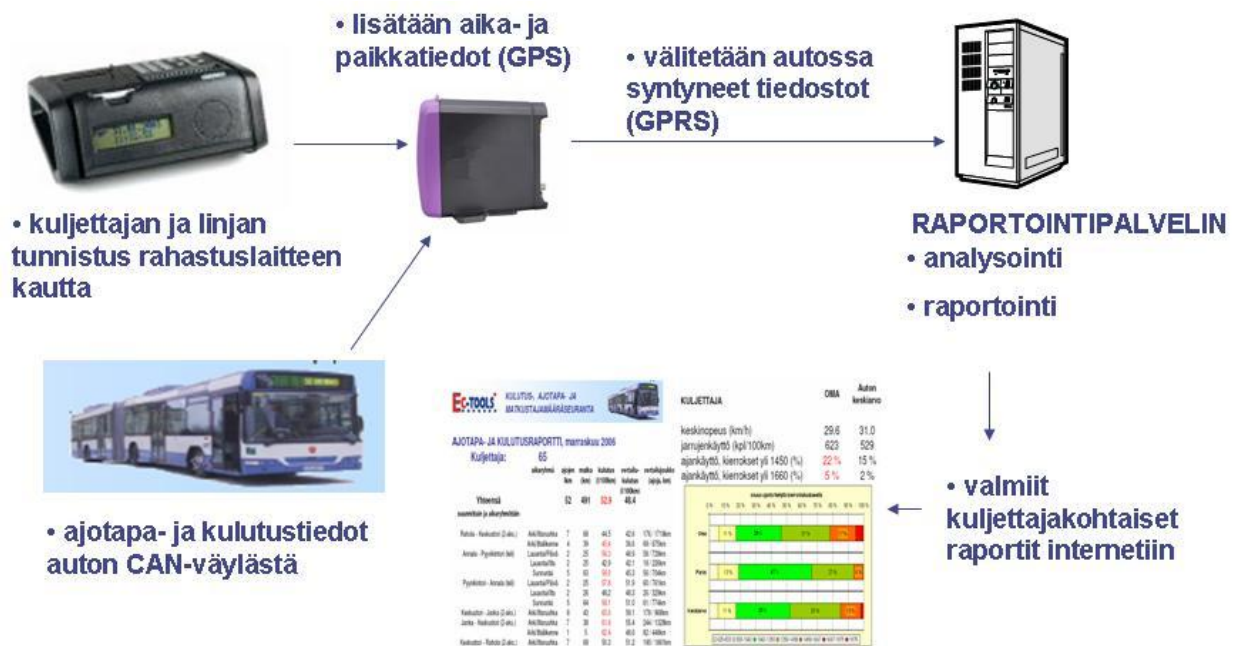
Kuljettajien kannustinjärjestelmiä on käytetty kuljetusyhteisöissä jossain muodossa jo pitkään, mutta kovin laajasti niitä ei ole yrityksissä hyödynnetty. Brittiläisessä tutkimuksessa kuudessa yrityksessä 88:sta oli käytössä kuljettajien kannustinjärjestelmä. Kanadalaisessa tutkimuksessa puolestaan luvut olivat kymmenen 42:sta. Kannustinjärjestelmien käyttö kiinnostaa kuljetusyhteisöjä. Brittiläisen tutkimuksen mukaan 58 % yrityksistä oli sitä mieltä, että kannustinjärjestelmästä olisi varmasti tai luultavasti hyötyä yritykselle. Kannustinjärjestelmien käyttöönotto koettiin kuitenkin liian monimutkaiseksi, eikä järjestelmän käytöstä ollut tarpeeksi tietoa. Suureksi esteeksi koettiin myös tarkan ja vertailukelpoisen kuljettajakohtaisen polttoaineenkulutustiedon puuttuminen.

Tarkan ja vertailukelpoisen kuljettajakohtaisen kulutustiedon puuttuminen on kannustinjärjestelmien suurimpia haasteita. Perinteisesti kannustinjärjestelmää käyttävässä

yrietyksessä jokaisella kuljettajalla on oma ”nimikkoautonsa”, jonka polttoaineenkulutus seurataan manuaalisella kirjanpidolla tankkausten yhteydessä. Yrityksen tasolla on asetettu jokin tavoitekulutus, jonka alittamisesta kuljettajaa palkitaan. Tällaista järjestelmää on kuitenkin helppo arvostella epäoikeudenmukaiseksi, koska ulkoiset tekijät, kuten autojen ominaisuudet, sääolosuhteet, liikenteen määrä, tien tyyppi ja geometria ja kuorman määrä vaikuttavat suuresti polttoaineenkulutukseen ja kuljettajan ajotavan osuutta kulutukseen ei todellisuudessa saada selville. Harvemmin myöskään on niin, että yhtä autoa ajaa vain yksi kuljettaja. Kuljettajan tunnistamiseen ja olosuhteiden vaikutusten huomiointiin voivat kuitenkin nykyaikaiset tieto- ja viestintäteknologiaa hyödyntävät ajoneuvojen seurantajärjestelmät tarjota ratkaisuja.

7.2.1 Kuljettajakohtainen ajotavan seuranta TKL:ssa

Tässä tutkimuksessa kehitettiin kuljettajien taloudellisen ajotavan kannustinjärjestelmä, jossa kuljettajien ajotavan seuranta ja palautteen antaminen toimivat automaattisesti ja oikeudenmukaisesti. Tutkimuksen pääkohdeyrityksenä oli Tampereen kaupungin liikennelaitos (TKL), jonka 12 kaupunkiliikenteen linja-autoon asennettiin kuvan 7.1 mukainen seurantajärjestelmä.



Kuva 7.1. TKL:n seuranta- ja raportointijärjestelmän periaate

Kuljettajan aloittaessa ajon hän kirjautuu rahastuslaitteeseen omalla tunnuksellaan ja näppäilee samalla myös linjan tunnuksen. Nämä tiedot välitetään seurantalaitteeseen kuten myös tiedot auton CAN-väylästä. Laite sisältää myös satelliittipaikannusominaisuuden, jonka kautta saadaan tiedot ajon ajankohdasta ja paikasta. Näillä tiedoilla tun-

nistetaan auton ajaman linjan osa, eli mihin suuntaan linjalla auto ajaa. Yhden linjan suunnan (esim. Hervannasta Keskustorille) ajaminen on yksi ajo. Jokaiselle ajolle määritetään ajokohtaiset tunnusluvut, jotka muodostavat kuljettajien ajotavan seurannan perusdatan. Näitä tunnuslukuja ovat: linja-auton numero, kuljettajanumero, linjan numero, suunta, kellonaika, suorite, polttoaineenkulutus sekä ajankäyttö eri kierroslukualueilla.

Ajon tunnusluvut lähetetään seurantalaitteen SIM-kortin kautta GPRS-yhteyden välityksellä raportointipalvelimen tietokantaan. Raportointipalvelimella ajot jaetaan ryhmiin, jotka muodostuvat linja-auton tyyppin, linjan, suunnan sekä ajankohdan perusteella. Ryhmän tiedot voivat olla kuukauden ajalta esimerkiksi tällaiset: Telibussilla on ajettu linjalla 18 suunnassa Atala-Keskustori arkipäivien päiväliikenteessä (ma-pe klo 9-14) 38 ajoa, joiden yhteispituus oli 421 km ja keskimääräinen polttoaineenkulutus 49,2 l/100km.

Kuljettajan tiedot voivat kuukauden ajalta yhden ryhmän osalta olla esimerkiksi seuraavat: Kuljettaja numero 32 (Kalle Kaasujalka) on ajanut telibussilla linjalla 18 suunnassa Atala-Keskustori arkipäivien päiväliikenteessä (ma-pe klo 9-14) 5 ajoa, joiden yhteispituus oli 56 km ja keskimääräinen polttoaineenkulutus 47,0 l/100km.

Jokainen kuljettaja ajaa kuukauden aikana useaan ryhmään kuuluvia ajoja. Näistä laskeaan kuljettajalle henkilökohtainen kuukauden keskikulutus kuljettajan kussakin ryhmässä ajamien ajojen keskikulutuksien (esimerkin 47,0 l/100km) kuljettajan suoritteella (esimerkin 56 km) painotettuna keskiarvona. Lisäksi lasketaan kuljettajalle henkilökohtainen kuukauden vertailukulutus, joka on kaikkien ryhmässä ajettujen ajojen keskikulutuksien (esimerkin 49,2 l/100km) kuljettajan suoritteilla (esimerkin 56 km) painotettu keskiarvo. Jokaisen kuljettajan kuukauden keskikulutus ja vertailukulutus ovat erilaisia, joten kuljettajien suoritusten vertailemiseksi lasketaan kuljettajille kuukauden säästöprosentti keskikulutuksen ja vertailukulutuksen suhteena. Säästöprosentti ilmaisee, kuinka monta prosenttia vähemmän polttoainetta kuljettaja on kuluttanut kuin keskimääräinen kuljettaja, joka olisi ajanut juuri samat ajot. Jos esimerkin ajot olivat kuljettajan ainoat kyseisessä kuussa, kuljettajan säästöprosentti olisi $100\% - (47,0/49,2) * 100\% = 4,5\%$.

Raportointipalvelin analysoi seurantatiedot automaattisesti ja luo kuukausittain jokaiselle kuljettajalle ajotapa- ja kulutusraportin, joka välitetään kuljettajalle internetin kautta. Kuukausiraportti koostuu yhteenvetosivusta, tarkemmasta ryhmäkohtaisesta ajojen erittelystä sekä ajotapasivusta, johon on koottu kulutusta selittäviä tunnuslukuja, kuten ajankäyttö eri kierroslukualueilla. Kuljettajaraporttien lisäksi luodaan esimiesten käyttöön yhteenvetoraportti, johon on listattu kaikki kuljettajat säästöprosentin mukaisessa paremmuusjärjestyksessä ja lisäksi autokohtaiset ja linjakohtaiset tiedot kuukauden ajoista.

7.2.2 Seurannan oikeudenmukaisuus ja luotettavuus

Tampereen kaupungin liikennelaitoksen seuranta- ja raportointijärjestelmä laajennettiin kattamaan koko linjasto marraskuun 2007 alussa. Vaikka laitteisto oli edelleen vain 12

linja-autossa, saatiin järjestelmässä kerättyä runsaasti tietoa, jonka pohjalta järjestelmän oikeudenmukaisuutta ja luotettavuutta voidaan arvioida. Tammi-kesäkuussa 2008 järjestelmä keräsi tietoa keskimäärin 337 kuljettajan ajoista kuukausittain. Tarkempaan tarkasteluun valittiin huhti-kesäkuulta vain sellaiset kuljettajat, joilla oli yli 200 km ajoja tutkimuskuukauden aikana ja ajoja joka kuukausi tutkimuskuuden eli tammi-kesäkuun aikana. Näitä kuljettajia oli keskimäärin 102 joka kuukausi. Järjestelmän oikeudenmukaisuutta ja luotettavuutta arvioitiin korrelaatioanalyysillä (Pearsonin korrelaatio), joista on esimerkki taulukossa 7.1.

Taulukko 7.1. Korrelaatiokertoimet huhtikuu 2008 (n=106).

	Suorite	Kuljettajan kulutus	Vertailukulutus	Säästö-% tämä kk.	Säästö-% ed. 3 kk.
Suorite	1.00				
Kuljettajan kulutus	0.23	1.00			
Vertailukulutus	0.17	0.76	1.00		
Säästö-% tämä kk.	-0.18	-0.75	-0.15	1.00	
Säästö-% ed. 3 kk.	-0.08	-0.66	-0.21	0.79	1.00

Taulukossa korostetut korrelaatiot kertovat järjestelmän oikeudenmukaisuudesta ja luotettavuudesta. Tämän kuukauden säästöprosentin ja vertailukulutuksen välinen korrelaatio oli huhtikuussa -0,15 ja huhti-kesäkuussa keskimäärin -0,13. Näiden välinen korrelaatio on siis hyvin heikko, mikä tarkoittaa, että kuljettajan säästöprosentti voi olla hyvä tai huono riippumatta siitä, millaisissa ryhmissä hän on ajoja ajanut. Toisin sanoen kuljettaja voi ajaa muita taloudellisemmin tai epätaloudellisemmin riippumatta ulkoisten olosuhteiden vaikutuksesta kulutukseen. Kuljettajan kulutus voi olla esimerkiksi 50 l/100km ja säästöprosentti 10 % ja toisaalta kuljettajankulutus 44 l/100km ja säästöprosentti -7 %. Ensimmäisen tapauksen kuljettaja on taloudellinen, mutta ajanut vaikeissa olosuhteissa, kuten ruuhka-aikoina. Jälkimmäinen kuljettaja on puolestaan epätaloudellinen, mutta ajanut helpoissa olosuhteissa, kuten ilta- ja yöaikaan. Järjestelmässä saadaan siis eroteltua kuljettajan vaikutus kulutukseen ja olosuhteiden vaikutus kulutukseen, jolloin kuljettajien taloudellisuuden vertaileminen on oikeudenmukaista.

Toinen tärkeä korrelaatio kertoo järjestelmän luotettavuudesta. Edellisten kolmen kuukauden säästöprosenttien kilometrimäärillä painotettu keskiarvo ja tämän kuukauden säästöprosentin välinen korrelaatio oli huhtikuussa 0,79 ja huhti-kesäkuussa keskimäärin 0,76. Korrelaatio on siis melko vahva, mikä tarkoittaa, että edellisten kolmen kuukauden aikana keskimäärin tietyn säästöprosentin saanut saa suurella todennäköisyydellä myös tässä kuussa samaa luokkaa olevan säästöprosentin. Toisin sanoen kuljettajien taloudellisuuden taso pysyy kuukaudesta toiseen melko tasaisena, mikä vaikuttaa reaaliaikailman ilmiönä varsin loogiselta. Järjestelmän antamat tulokset vaikuttavat siis uskottavilta ja luotettavilta usean kuukauden ajalta.

7.2.3 Kehitystyö Transpoint Oy:ssä

Kannustinjärjestelmän kehitystyö käynnistyi Transpoint Oy:ssä syyskuussa 2007. Kehitystyö organisoitiin projektityöryhmään, johon kuului Transpointin tuotanto-, henkilöstö-, kehitys- ja hallintoasioista vastaavia henkilöitä sekä TTY:n tutkijoita. Myöhemmin

ryhmään otettiin mukaan myös kuljettajien edustaja. Transpointilla oli alusta alkaen pyrkimys laajan kannustinjärjestelmän luomiseen. Kannustinjärjestelmään sisällytetään mittareita monipuolisesti kuljettajan työn eri osa-alueilta, ei pelkästään ajotapamittaria.

VR-konsernin arvot ovat turvallisuus, tyytyväinen asiakas, yhdessä menestyminen ja vastuullisuus (VR 2006). Arvojen pohjalta kannustinjärjestelmässä mitattaviksi kokonaisuuksiksi valittiin ajotapa, oikea toiminta ja henkilöstön osallistuminen. Mittareita ovat ajotapaindeksi, liikennevahinkojen määrä, kuljetusvaurioiden määrä, poissaolojen määrä sekä asiakastyytyväisyys. Lisäksi seurataan aikataulussa pysymistä, mutta tämä ei ole palkitsemisen peruste. Kullakin mittarilla on oma painoarvonsa kokonaisuudessa ja suurin painoarvo on ajotapaindeksillä. Kokonaisuudesta 80 % määräytyy henkilökoh- taisten ja 20 % valtakunnallisten mittareiden perusteella.

Transpointissa pyritään kannustinjärjestelmään, joka edellyttää tietojen yhdistelemistä useista eri tietolähteistä. Tästä johtuen myös ajotapaindeksiin liittyvät tiedot pitäisi pys- tyä käsittelemään yrityksen sisällä. Tällaisen toimintamallin etuna on riippumattomuus seurantalajärjestelmän toimittajasta. Seurantalaitteita voidaan hankkia useilta eri laitetoimittajilta tai vakiovarusteena autoja hankittaessa, kunhan laitteista saadaan tarvittavat tiedot ajotapaindeksin muodostamiseksi. Tiedonkäsittely yrityksen sisällä mahdollistaa myös nopean raportoinnin, mikä onkin järjestelmän tavoitteena. Kuljettajien pitäisi pys- tyä tarkastelemaan työsuoritustaan jopa päivittäin. Kannustinjärjestelmää on tarkoitus pilotoida vuoden 2009 alusta alkaen Kajaanin terminaalin autoilla.

Polttoaineenkulutuksen mittaus on ajotapaindeksin osana olennainen osa kannustinjär- jestelmää. Tarkempaa ajotapaindeksin muodostamista varten kerättiin tutkimuksen ai- kana tietoa, mutta lopullista ajotapaindeksiä ei ehditty muodostaa, eikä polttoaineenku- lutuksen oikeudenmukaisen seurannan edellyttämiä ajojen ryhmittelyjä tehdä. Trans- pointissa kuitenkin tunnistettiin, että liikenteessä voidaan erotella erityyppisiä kuljetuk- sia, kuten jakelu, siirto ja keräily. Kuljetukset tapahtuvat vaihtelevilla reiteillä, joten reittikohtaista tarkastelua linja-autoyrityksen tapaan ei voida tehdä. Reitin sijaan voi- daan tarkastella esimerkiksi erilaisilla tieluokilla tapahtuvia kuljetuksia omina ryhmi- nään. Kellonajalla ei ole kuorma-autoliikenteessä samanlaista merkitystä kuin linja- autoliikenteessä. Päivä- ja yöliikenne voidaan kuitenkin erottaa omiksi ryhmikseen. Kaupunkien sisällä tapahtuvissa kuljetuksissa kellonajalla on samanlainen merkitys kuin linja-autoliikenteessä. Kuorma-autolla ajetaan usein jatkuvasti samantyyppisiä ajoja, joten kuljettajien ajotapojen vertaileminen tietyllä autolla ajettujen ajojen kautta voisi olla mahdollista.

Kuorman paino vaikuttaa erittäin paljon kuorma-auton polttoaineenkulutukseen. Trans- point oli mukana myös RASTUn automaattista kuormantunnistusta kehittäneessä osa- hankkeessa. Hankkeen tavoitteena oli parantaa taloudellisuutta käyttämällä tunnistettua kuorman painoa taloudellisen ajotavan arvioimisen sekä siihen kouluttamisen ja kannus- tamisen osatekijänä. Luotettava automaattinen kuormantunnistus parantaa polttoaineen- kulutuksen vertailua. Kuormantunnistuksen avulla voidaan kuljetusten polttoaineenku- lutus ilmoittaa tunnusluvulla litraa/tonnikilometri. Tällainen tunnusluku olisi erittäin hyödyllinen yritystasolla esimerkiksi kuljetusreittien suunnittelussa tai koko toimialan tasolla kuljetusketjujen energiakatselmuksen tietona ja yritysten keskinäisen energiate-

hokkuuden vertailun pohjana sekä valtakunnallisesti kuljetusalan energiatehokkuusso-
pimuksen seurannan välineenä.

7.2.4 Yhteenveto

Energiankulutuksen pienentämisen merkitys kuljetusyrityksien kilpailukyvyllä kasvaa jatkuvasti. Kuljettajien ajotavoilla on hyvin suuri merkitys energiankulutukseen. Tarkka ja automaattinen polttoaineenkulutuksen kuljettaja- ja autokohtainen seuranta on perusedellytys energiankulutuksen pienentämiselle. Kuljettajakohtainen seuranta mahdollistaa palautteen antamisen, palkitseminen ja kohdennetun koulutukseen ohjaamisen, eli kuljettajien kannustinjärjestelmän luomisen. Seurannan oikeudenmukainen ja luotettava toteutus on kuitenkin ollut vaikeaa, koska polttoaineenkulutukseen vaikuttavat suuresti myös kuljettajasta riippumattomat tekijät, kuten tien geometria, muun liikenteen määrä ja auton ominaisuudet. Nykyaikainen tieto- ja viestintäteknikka mahdollistaa kuitenkin älykkäiden kuljetusyritysten energiankulutuksen seuranta- ja kannustinjärjestelmien rakentamisen. Älykkäissä järjestelmissä kuljettajan vaikutus polttoaineenkulutukseen saadaan erotettua ulkoisten tekijöiden vaikutuksesta, jolloin kuljettajien oikeudenmukainen vertailu, palkitseminen ja kohdennettu kouluttaminen ovat mahdollisia.

Kuljettajien taloudellisen ajotavan kannustinjärjestelmällä voidaan parantaa ja pitkittää taloudellisen ajotavan koulutusten vaikutuksia, mikä tuo säästöjä kuljetusyritykselle. Tampereen kaupungin liikennelaitokselle kehitetty järjestelmä on osoittautunut periaatteiltaan toimivaksi kaupunkibussiliikenteen käyttöön. Nykyisellään 12 seurantabussia käsittävää järjestelmää on esitelty kuljettajille koulutusten ja kehityskeskustelujen yhteydessä. Kuljettajien vastaanotto on ollut positiivista ja kiinnostunutta. Järjestelmän tuottama kuukausiraportti on todettu erinomaiseksi työkaluksi kehityskeskusteluissa ja se on herättänyt kuljettajien mielenkiinnon ajotapojaan kohtaan. Järjestelmässä raportoidaan myös autokohtaisia kulutuksia, mikä on jo auttanut tunnistamaan rikkinaisen tai väärin säädetyn bussin. Linjakohtaisen kulutustiedon saaminen puolestaan auttaa liikenneitsijää hinnoittelemaan linjat paremmin kustannustasoa vastaavasti.

TKL:n järjestelmän ytimessä olevaa laitteistoa ja vertailuryhmäajattelua voidaan soveltaa myös pitkämatkaiseen bussiliikenteeseen ja kuorma-autoliikenteeseen. Seuranta- ja kannustinjärjestelmiä rakennettaessa on kuitenkin pidettävä mielessä, että toimiva järjestelmä saadaan aikaan vain yrityskohtaisen kehitystyön tuloksena. Tässä kehitystyössä on erittäin tärkeää, että yrityksen johto on vahvasti sitoutunut asiaan ja kuljettajien käsityksiä polttoaineenkulutuksen oikeudenmukaisesta seurannasta kuunnellaan tarkasti. Kuljettajien kokemus oikeudenmukaisuus kun on onnistuneen seuranta- ja kannustinjärjestelmän tärkein ominaisuus. Onnistunut seuranta- ja kannustinjärjestelmä kiinnittää koko yrityksen henkilöstön huomion taloudelliseen ajotapaan ja kannustaa niin henkilökohtaiseen panokseen kuin yhteistyöhön kuljetusyrityksen energiankulutuksen pienentämiseksi ja siten yrityksen kannattavuuden ja kilpailukyvyyn parantamiseksi.

8 ENERGIANSÄÄSTÖTOIMENPITEIDEN TEHOKKUUDEN ARVIOINTI

Vastuutaho: VTT ja TTY

Teksti: Kari Mäkelä

Kuorma- ja linja-autojen energiansäästöohjelmia varten joudutaan rakentamaan järjestelmiä, joilla kerätään kuljetusyritysten polttoainenkulutustietoja laajempaan järjestelmään vietäväksi. Kokonaisjärjestelmää käytetään arvioitaessa kuljetussektorin energiatehokkuuden kehittymistä. Energiapalveludirektiivi edellyttää energiansäästötoimenpiteiden toteuttamista. Kuorma-autosektorille on jo kehitetty EMISTRA-järjestelmä, johon kuljetusyritykset voivat syöttää polttoainenkulutus-, kilometri- ja tonnikilometri-tietoa. Tämän lisäksi tarvittaisiin myös vakioitu, energiakatselmustyyppinen menettely, joka huomioi kuljetusyrityksen kaluston muutokset, tekniset parannukset, huollot, kuljettajien koulutukset jne. Tällainen järjestelmä mahdollistaa HDenergia- ja RASTU-projekteissa tehdyn mittaus- ja tutkimustyön jalkauttamisen käytännön tasolle. Näin voitaisiin sekä arvioida säästöpotentiaaleja että eri säästötoimenpiteiden kustannustehokkuutta.

Tässä osatehtävässä arvioitiin useita tapoja tuottaa energiansäästötoimenpiteiden tehokkuuden arviointilaskelmia. Toimenpiteiksi voidaan lukea esimerkiksi uudempiin euroluokkiin siirtyminen, energiaa säästävien renkaiden käyttöönotto, energiaa säästävien öljyjen käyttöönotto ym. Energiapalveludirektiivi edellyttää sellaista energian säästön laskentaa, joka ei riipu kulutetun, todellisen energian määrästä. Perusajatuksena on, että laskelmilla voidaan osoittaa, miten paljon enemmän energiaa nyt kuluisi, ellei toimenpiteitä olisi tehty. Tällöin todellinen energiankulutus on voinut nousta tai laskea.

Laskennan testausta varten tehtiin Excel-malli, johon voidaan syöttää kalustomääriä ja niiden ominaisuuksia eri tarkasteluajankohtina. Kalustossa tapahtuneiden muutosten vaikutuksia energiankulutukseen lasketaan kertoimien avulla, jotka kuvaavat eri toimenpiteiden keskinäisiä eroja kulutuksessa. Kun kaikki toimenpiteet on kuvattu malliin, saadaan muutoksen kokonaisvaikutus tarkasteluajankohtien välillä.

Vaikka perusajatus on yksinkertainen, mutkistuu tehtävä heti, kun mukana on runsaasti kalustoa ja niihin tehdään runsaasti toimenpiteitä eri aikoina. Samoin kaluston määrä muuttuu, autot vaihtuvat pitkin vuotta ja tilalle tulevasta autosta ei aina tiedetä esimerkiksi sen euroluokitusta. Operaattorit eivät vielä seuraa yhtenäisellä tavalla esim. kulu-tusta, huoltoja jne. Tämä kaikki luo haasteita sekä järjestelmän tekemiseen, että sen menestykselliseen käyttöön.

Resurssipulasta ja tehtävän hankaluudesta johtuen varsinaiseen järjestelmän toteutukseen ei RASTU-kokonaisuuden puitteissa päästy. Tehdyt selvitykset luovat kuitenkin hyvän pohjan työn jatkamiselle.

Vuoden 2008 aikana EU-tasolla on valmisteltu menetelmiä ja toimenpidelistoja, joita voidaan käyttää energiapalveludirektiivin tarkoittamien toimenpiteiden toteennäyttämisessä tavoitteen saavuttamiseksi (9 %:n säästö). Tämä RASTU-kokonaisuuden alahanke on juuri tähän EU:n aihepiiriin vastauksia antava ja välttämätön kehityskohde Suomen toimenpiteiden esiintuomiseksi. Tämän vuoksi jatkoselvitykset on luontevaa sisällyttää alkavaan TRANSECO-tutkimusohjelmaan.

9 MENETELMÄKEHITYS

Vastuutaho: VTT

Teksti: Kimmo Erkkilä, Juhani Laurikko & Nils-Olof Nylund

9.1 YLEISTÄ

Vuoden 2006 vuosiraportissa käsiteltiin mm. mittarenkaiden käyttöönottoa, vertailukelpoisten mittaustulosten muodostamista sekä maantiellä tapahtuvia. Seuraavana vuonna renkaiden osalta varmistettiin, että mittaukset maantiellä ja alustadynamometrillä antavat yhteneväiset vierinvastustulokset.

Alkuvuodesta 2008 tehtiin bussien pakokaasumittauksia kylmissä olosuhteissa Rissalan lentokentällä PEMS (Portable Emissions Measurement System) -laitteistolla. VTT:n laboratoriossa alustadynamometrillä voidaan tehdä mittauksia vain ns. normaalissa huoneen lämpötilassa.

Kentällä kylmissä olosuhteissa tehdyissä mittauksissa kannettava emissiomittauslaitteisto (PEMS) oli avainasemassa. PEMS on laite joka voidaan asentaa ajoneuvoon ja tutkia päästöjä todellisten ajosuoritteiden aikana. Näissä mittauksissa käytettiin Volvota (Volvo Buses) Ruotsista lainattuja mittalaitteita.

9.2 PEMS MITTAUKSET

9.2.1 Mittausjärjestelyt

PEMS -laite saatiin käyttöön Volvo Powertrainsiltä Ruotsista. Laitteisto esiasennettiin kahteen tutkittavana olevaan kaupunkibussiin ennen varsinaisten mittausten aloittamista. Testisyklinä käytettiin SORT 2-sykliä, joka kuvaa yleisesti kaupunkibussin ajotapah- tumaa. Alkujaan matkaan perustuva SORT-sykli muokattiin aikapohjaiseksi, joten erillistä merkattua mittarataa ei tarvinnut järjestää.

Mittauspaikaksi valittiin Rissalan lentokenttä Kuopiossa. Tukikohtana mittausten välillä toimi Kuopion Liikenteen varikko. Lentoliikenteen aiheuttaman häirinnän vuoksi ja kylmemmän sään varmistamiseksi mittaukset tehtiin yöaikaan.

Testiajoneuvon annettiin seisoa ulkona päivän ajan, jotta ajoneuvon voitiin katsoa olevan kylmä. Käynnistyksen jälkeen ajoneuvon sallittiin käydä 5 min ennen mittauksen aloittamista. Varsinaisen mittauksen aikana SORT 2 sykliä toistettiin niin monta kertaa, ettei jäähtytynesteen lämpötila enää merkittävästi muuttunut. Tässä vaiheessa ajoneuvon voitiin katsoa olevan vakioitunut.

9.2.2 Kalusto

Testeihin valittiin kaksi eri jälkikäsittelytekniikan tasoa edustavaa bussia. Nämä olivat Volvo Euro III, tyypillinen kaupunkibussi pääkaupunkiseudun liikenteessä, ja Volvo EEV, SCR jälkikäsittelylaitteistolla varustettu kaupunkibussi, joka edusti uusinta moottori- ja puhdistusteknikkaa



9.2.3 Tulokset

9.2.3.1 Menetelmävertailu

PEMS-testin tuloksia verrattiin samalla yksilöllä mitattuun laborioritestiin (taulukko 9.1). Testimenetelmät eroavat toisistaan joten eroavaisuutta tuloksissa oli odotettavissa.

PEMS-tuloksissa NO_x päästöt olivat noin 7 % matalammat laborioritestiin nähden, CO₂ ja CO tulos taas hiukan korkeammat. HC päästöissä prosentuaaliset erot olivat suuria, mutta absoluuttiarvot olivat erittäin pieniä. Huomioiden analysointoreille ominaiset epätarkkuudet, voidaan PEMS-tulosten katsoa korreloivan hyvin laboriorilaitteiston kanssa.

Taulukko 9.1. Ylempään osioon on listattu Volvo EEV laboratorio testit ja niiden keskiarvo. Alemmpi osio sisältää Volvo EEV PEMS testit viimeisen viiden keskiarvon sekä kulutukseen pohjautuvan korjauksen.

EEV

Results AMA

CO(g/km)	HC(g/km)	NOx(g/km)	CO2(g/km)	PM(g/km)
1.8	0.007	8.6	1115	0.035
2.1	0.035	8.8	1116	0.034

1.9	0.021	8.7	1116	0.034	0.44 l/km
-----	-------	-----	------	-------	-----------

EEV

Average last 5

CO(g/km)	HC(g/km)	NOx(g/km)	CO2(g/km)	PM(g/km)	
1.9	0.061	8.0	1108		0.43 l/km
Hck	2.0	0.062	8.1	1132	0.43 l/km
	-0.1 %	191.7 %	-8.6 %	-0.7 %	-0.9 %
	2.2 %	198.1 %	-6.6 %	1.5 %	-0.9 %

9.2.3.2 Kenttättestit

Sääolot testien välillä poikkesivat hiukan ja vaikka pakkastavoitteeseen ei päästy, voidaan testin katsoa kuvaavan Suomelle tyypillisiä ilmasto-oloja.

Ambient temperature

Euro 3	-2
EEV	0

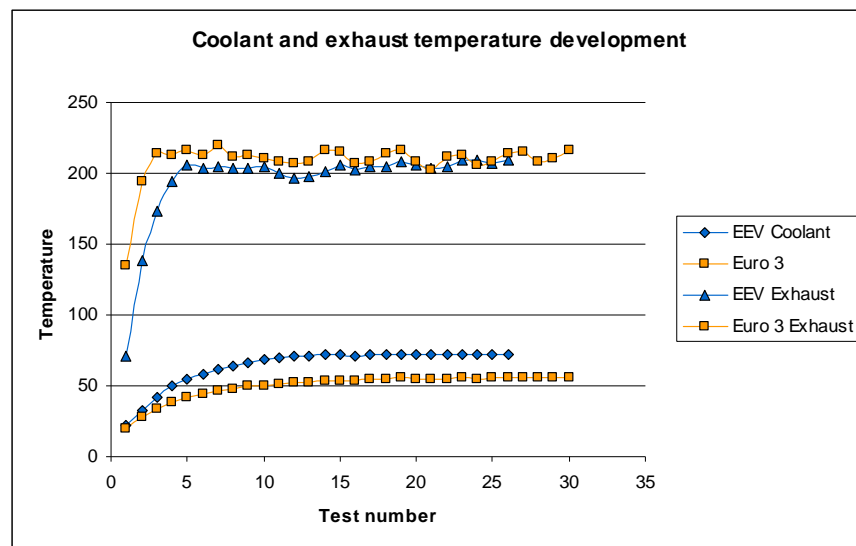
End of test

Exhaust

Euro 3	213
EEV	207

Coolant temperature

Euro 3	56
EEV	72

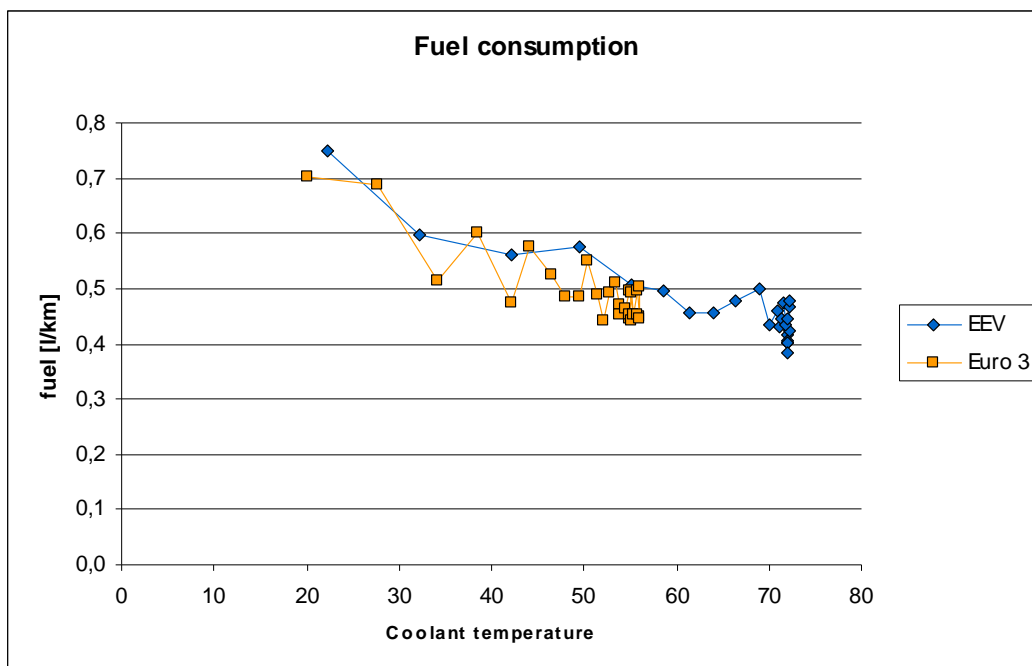


Kuva 9.1. Testiolosuhteet ja ajoneuvojen tila testin lopussa.

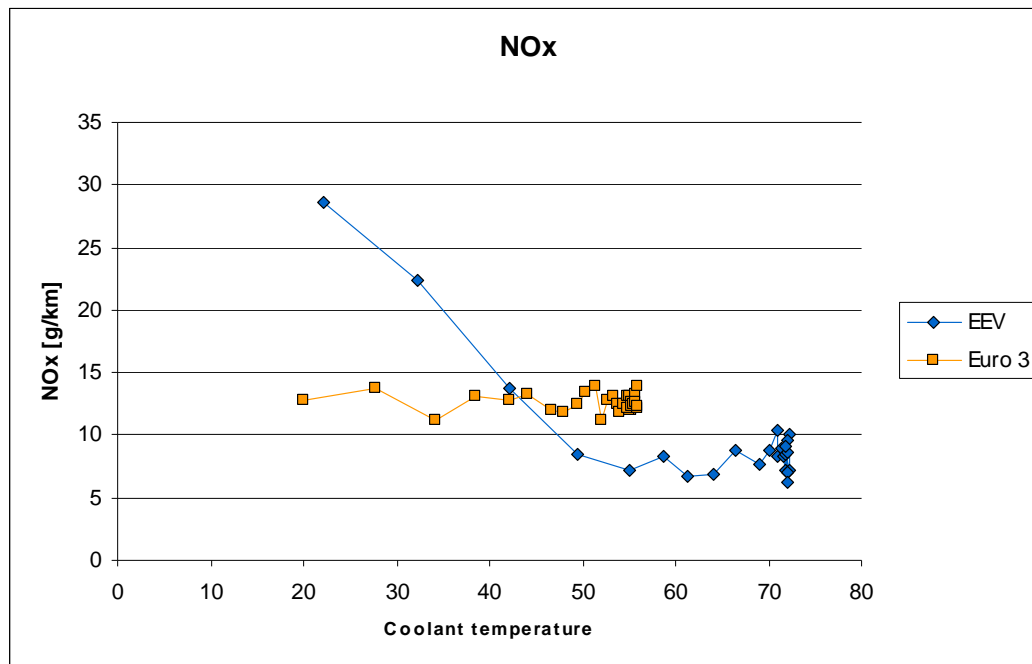
Kuvasta 9.1 nähdään, kuinka molempien testiajoneuvojen lämpötilat kohosivat mittausjaksojen aikana. Euro III-auton osalta jäähdytysnesteen lämpötila on tasaantumisen jälkeenkin huomattavan alhainen, mutta vakioitunut. Alhainen taso johtuu todennäköisesti termostaatista, jolla on matala avautumislämpötila.

Polttoaineen kulutus laskee tasaisesti ajoneuvojen lämmitessä. Euro III-auton tapauksessa kulutus laskee noin 30 % ja EEV-auton kohdalla jopa 40 %. Tekniikan tasolla ei näytä olevan tältä osin vaikutusta ajoneuvojen käyttäytymiseen kylmässä.

Päästöesimerkki typenoksideista osoittaa EEV SCR tekniikan tunnetun herkkyyden pakokaasunlämmölle. Merkillepantavaa on myös matalilla jäähdytysnesteen lämpötiloilla (eg. kylmä auto) mitattujen päästöjen ero. Päästökuvaajassa on syytä huomioida esitystapa moottorin lämpötilaa vastaan. Kuten kuvasta 9.1 käy ilmi, pakokaasujen lämpötila kohosi lopulliselle tasolle noin 4 testiin mennessä (5 min) aikana. 4 testin kohdalla EEV auton NO_x päästö laskee normaalille tasolle (kuva 9.3). Normaalissa päiväliikenteessä ajoneuvo ei enää lämpenemisen jälkeen pääse jäähtymään merkittävästi.



Kuva 9.2 Polttoaineen kulutus



Kuva 9.3 Typenoksidit

9.2.4 Johtopäätökset

PEMS-laitte sopii hyvin kenttätesteihin ja vaikeiden olosuhteiden tutkimiseen. Laitteisto tarjoaa mielenkiintoisen uuden tutkimusalueen, josta saatua tietoa voidaan varmasti hyödyntää. PEMS-laitetta ei kuitenkaan voida pitää korvaajana täysimittaiselle laboratoriolaitteistolle, eikä sen avulla voida tehdä tarkkuutta vaativaa kulutus- tai päästövertailua ajoneuvojen välillä. Laitteisto vaatisi lisää testaamista ja tulosten analysointia lisäjohtopäätösten tekemiselle. Myös kylmän ilmanalan testausta tullaan jatkamaan.

10 PAKOKAASUTUTKIMUS

Vastuutaho: VTT

Teksti: Maija Lappi, Anu Solla, Kimmo Erkkilä & Nils-Olof Nylund

10.1 JOHDANTO

Vertailtaessa tekniikaltaan ja päästötasoltaan erilaisia ajoneuvoja on tarpeen analysoida myös ns. sääntelemättömiä päästöjä. Säännellyiksi päästöiksi kutsutaan sellaisia komponentteja, joiden enimmäismääriä pakokaasulainsäädäntö rajoittaa. Näitä ovat nykyään CO, THC (hiilivetyjen kokonaismäärä), NO_x ja hiukkasten kokonaismassa. Nämä päästöt eivät kuitenkaan aina anna riittävää kuvaa pakokaasujen ominaisuuksista, niiden vaikutuksesta ympäristölle tai mahdollisesta altisteesta ihmisille. Mittausmenetelmät on alun perin kehitetty ajoneuvojen vertailuun ja tyyppihyväksyntään. Erilaisia ajoneuvo-tekniikoita vertailtaessa on syytä tarkemmin tutkia mm. hiilivetyjen ja hiukkasten tarkemmasta koostumusta sekä analysoida karbonyyliyhdisteitä.

Suoraan RASTUn puitteissa tehtiin tiettyjä sääntelemättömien päästöjen mittauksia sekä vanhaa että uutta tekniikkaa edustavista ajoneuvoista. NO₂-ongelmaan kohdistuva osa toteutettiin erillisprojektissa ”Uusiutuvien ajoneuvojen yhteys katualueiden NO_x-yhdiste- ja hiukkaspitoisuuksiin (Uusipäästö)”, jota rahoittivat VTT, Ympäristöministeriö, YTV, Autotuojat ry, Gasmet Technologies Oy, Helsingin ympäristökeskus ja Ilmatieteen laitos. Uusipäästö-projekti raportoi tuloksiaan sopimuksen mukaisesti erityisesti pakokaasujen NO/NO₂ suhteen osalta myös RASTU-projektille. Taustalla on havaittu tosiasia, että kaupunki-ilman NO₂ pitoisuudet eivät ole laskeneet, vaikka ajoneuvojen NO_x päästöjä on rajoitettu merkittävästi.

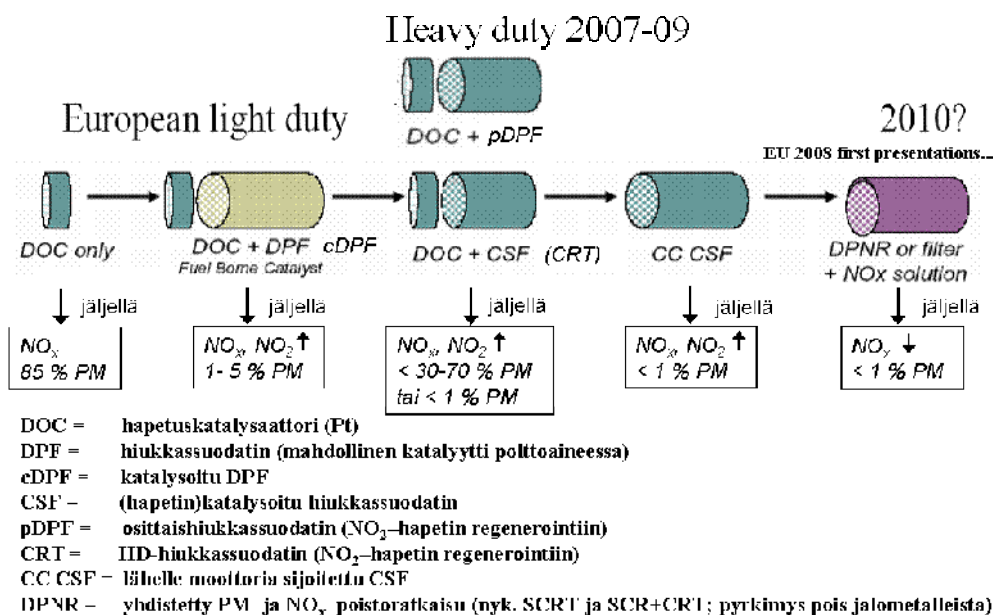
10.2 NO/NO₂ SUHDE JA SEN MERKITYS KAUPUNKI-ILMAAN

Sekä NO- että NO₂ -määrät ja niiden suhteet ovat hyvin voimakkaasti moottoritekniikan, polttoainetekniikan, pakokaasun jälkikäsittelytekniikan ja ajotavan funktioita. NO₂ -määrä on riippuvainen paitsi moottorin palotilan lämpötilasta myös moottorin jälkeisistä lämpötiloista. NO₂ -muodostus on vahvasti sekä pakokaasun lämpötilan että erityisesti dieselauton jälkikäsittelylaitteen lämpötilan funktio.

Uusipäästö hankkeessa tutkittiin päästölainsäädännön, pakokaasun jälkikäsittelytekniikoiden, verotus- ja kannustekäytäntöjen mukana muuttuvan kaupunkiajoneuvokannan vaikutusta vilkkaasti liikennöityjen katualueiden NO_x-yhdiste- ja toissijaisesti primäärihiukkasmääriin. Tuloksena tuotettiin mm. todellisia NO- ja NO₂-päästökertoimia kevyiden (light-duty, LD) ja raskaiden (heavy-duty, HD) ajoneuvojen kaupunkiajosta eri ajoneuvoluokissa, sekä mallinnettiin em. pohjalta kaupunki-ilman laatua ja päästöjen leviämistä katukuiluissa ja avoimilla väylillä.

Raskaille ajoneuvoille tehtiin päästömittauksia kaikkiaan 24:lle Euro II – Euro V & EEV –päästötason bussille (vuosimalli 1999 – 2008) ja 8:lle Euro IV-tason kuorma-autolle. Kaikki ajoneuvot edustivat kaupunkiliikenteessä olevaa autokantaa. Uudet tutkitut bussit ja kuorma-autot sisälsivät ratkaisuja, jotka oli optimoitu joko NO_x –tason tai hiukkaspäästön alentamiseen, tai molempiin. Linjauksesta riippuen jälkikäsittelytekniikka oli hyvinkin erilaista. Jälkikäsittelylaitteiden tekniset sukupolven muutokset päästölainsäädännön kehityksen mukana näkyvät kuvassa 10.1.

Vanhimmat autot edustavat kaupungissa ruuhka-aikoina käytössä olevaa bussikantaa, joissa joko ei ole pakokaasun jälkikäsittelylaitteita tai niitä on jälkiasennettuna. Euro IV- ja Euro V-ajoneuvot tuottavat aiemmista päästötasosta eroavia NO_x -yhdiste- ja hiukkaspäästöjä, koska ajoneuvoissa on tehokkaita pakokaasun jälkikäsittelylaitteita. Tässä joukossa esiintyi myös korkeita emissiotasoja, erityisesti NO_2 :lle, koska osa HD-jälkikäsittelykonsepteista tähtää vasta Euro V-päästöaikakaudelle ja on vielä kehitysvaiheessa. NO_2 :een erillisenä päästökombinaattina ei edes tarvitse kiinnittää huomiota. Erityisen "puhtaita" ovat luonnollisesti hyväkuntoiset maakaasu- eli CNG -autot, joissa on ottomoottori ja kolmitoimikatalysaattori TWC.



Kuva 10.1. Pakokaasun jälkikäsittelylaitteiden kehityssuuntaukset.

Autojen päästömittaukset tehtiin VTT:n alustadynamometrillä käyttäen ajoneuvoille tyypillisiä ajoprofiileja. Busseille käytettiin enimmäkseen yleisimmin Euroopassa käytettävää ja vanhinta kaupunkiajosimulaatiota "Braunschweig city bus cycle". RASTU -projektin ajoneuvojen, Euro II - EEV-bussien NO_2/NO -suhteet ja ominaispäästöt kuvaavat kaupunkiajoa pääasiassa tällä ajotavalla.

Eri sykleillä sekä NO:n että NO₂:n päästö aikayksikössä (/s) oli jokseenkin riippumaton kaupunkiajon nopeudesta eri sykleissä. Kuitenkin, mitä hitaampaa kaupunkiajo on, sitä enemmän NO:ia ja NO₂:ia muodostuu ajomatkaa kohti.

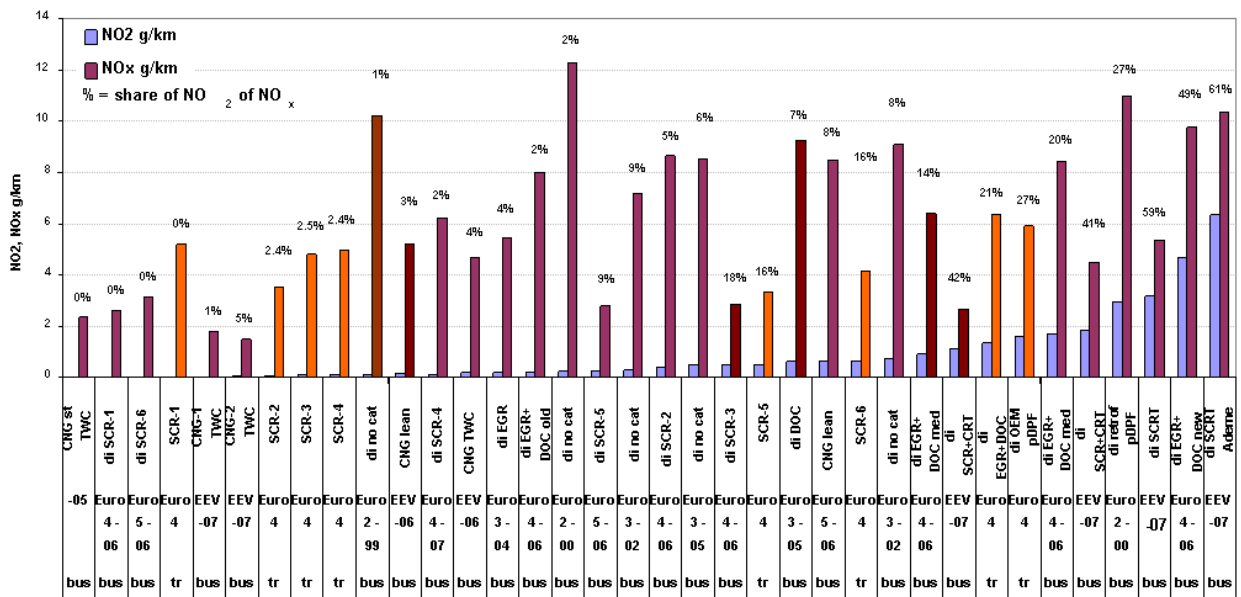
Kuorma-autoille käytettiin VTT:n todellisissa tieolosuhteissa taltioimia jakelu-, maantie- ja moottoritiesyklejä. Koska päästötulosten haluttiin kuvaavan taajama-ajoa, kuorma-autopäästötulokset ovat pääasiassa jakelusykleistä, jossa keskinopeus oli n. 37 km/h. Maantie- ja moottoritiesuoritteiden keskinopeudet olivat 80 ja 83 km/h.

NO/NO₂ -päästötulokset kaikkia julkisessa liikenteessä olevia busseja edustavista sekä joistakin Suomen markkinoilla vielä v.2007 esiintymättömistä uusimmista ajoneuvotekniikoista sekä tutkitusta Euro IV -kuorma-autojoukosta ovat kuvassa 10.2. Kaikki CNG-bussit olivat uusia, vm. 2005-2007. Euro IV-EEV -ajoneuvojen vertailujoukkona olivat katalysaattorittomat Euro II-Euro III -päästötason bussit, hapetuskatalysaattorilla varustettu uudehko Euro III-päästötason bussi sekä "particle catalyst" -tyyppisellä jälkiasennetulla osittaishiukkassuodattimella varustettu Euro II-tason bussi. Taajamabussiajossa ongelmallisia jälkikäsittelytekniikoita suoran NO₂:n kannalta ovat tällä hetkellä (ositais)hiukkassuodattimelliset ajoneuvot, niin ensiasennus- kuin jälkiasennuskatalysaattoritekniikatkin, sekä uudet ja tehokkaat hapetuskatalysaattorit (& EGR). Niiden pakokaasuissa NO₂-taso voi olla huomattavan korkea ja NO₂:n osuus NO_x:sta suuri, 25 %:sta yli 60 %:iin. Korkein NO₂-emissio ja osuus NO_x:sta saatiin EEV-tason SCRT-ajoneuvosta ajettaessa sitä hitaalla Pariisin keskustasyklillä (Ademe, matkanopeus 10.8 km/h). SCRT on yhdistelmätekniikkaa, jossa jälkikäsittelylaitteeseen on yhdistetty sekä NO_x -poisto SCR-laitteella että hiukkaspoisto DPF-puhdistimella. Varsin korkeita NO_x-päästöjä mitattiin joistakin Euro IV- ja EEV-tason ajoneuvoistakin.

Euro -päästörajoitukset on määritelty HD-moottorin emissiona tehoa kohti, so. g/kWh. Arvioituna bussikalustolle tyypillisellä tehonkulutuksella ajosuoritetta kohti laskettuna Euro III-raja on n. 9 g/km ja Euro IV-raja n. 7 g/km.

Bussin NO/NO₂ -suhde ei puolestaan ole bussin elinaikana välttämättä pysyvä. Kuvan 10.2 Euro IV-tason EGR+hapetuskatalysaattori-bussin NO ja NO₂ määritettiin 30 tkm, 130 tkm ja 244 tkm:n ajon jälkeen. NO₂:n osuus NO_x:sta laski 50 %:sta alle 5 %:iin runsaan 200 000 km:n ajon aikana. Syynä lienee hapetuskatalysaattorin toiminnan hiipuminen. Ottomoottorilla varustettujen stoikiometrinen tai lähes stoikiometrinen maakaasubussien NO_x-päästötaso on yleensä selvästi alempi kuin dieselbussien, kuten myös on näiden CNG -bussien NO₂/NO_x -suhde, alle 5 % (kuva 10.2). Palamisreaksion polttoaine/ilmasuhteesta riippuen maakaasubusseissa käytetään joko kolmitoimi- että hapetuskatalysaattoreita.

Samat havainnot kuin busseille pätevät myös kuorma-autoihin (oranssit palkit, kuva 10.2). Vielä Euro IV-päästötasolla on ainakin suoran NO₂:n osalta ongelmallisia jälkikäsittelytekniikoita. Korkeita NO₂/NO -suhteita ja suuria NO₂:n absoluuttipäästöasoja syntyi osittaishiukkassuodattimissa, hapetuskatalysaattorissa sekä joissakin SCR-sovelluksissa. Osuudet eivät olleet aivan niin korkeita kuin busseista, mikä johtunee suuremmista ajonopeuksista ja siten korkeammista lämpötiloista.



Kuva 10.2. Euro II – Euro V/EEV –päästötason bussien ja kuorma-autojen NO- ja NO₂ –päästö kaupunkiajossa. Yleensä Braunschweig –sykli busseille ja jakelu/maantiesykli kuorma-autoille.

Vertailevat ominaispäästöt (kuva 10.2) eri ajoneuvotyypeille on laskettu erilaisista ajo-suoritteista ja suhteutettu ajonopeuteen. On hyvä muistaa, Braunschweig–bussisyklin keskinopeus on 22.5 km/h ja kuorma-autojen jakelusyklin n. 65 % suurempi.

Koska ajoneuvokokeet busseilla, kuorma-autoilla ja henkilöautoilla olivat Uusipäästö – projektissa kattavat, ja edustivat hyvin tällä hetkellä kaupunkiliikenteessä olevaa auto-kantaa ja kaupunkiajotapoja, tehtiin aineiston perusteella arvioita raskaan ja kevyen liikenteen merkityksestä NO_x & NO₂–lähipäästöille.

Bussien ja kuorma-autojen suuremmasta moottoritehosta johtuen ne ovat luonnollisesti typen oksidien tuottajina aivan eri suuruusluokkaa kuin henkilöautot. Joukkoliikenne-kaduilla bussien osuus voi helposti nousta lähelle 20 %:ia, jolloin raskaat ajoneuvot ovat ylivertainen päästölähde kaupunki-ilmaan sekä NO_x:in että NO₂:n osalta. Tämän tutkimuksen mukaan tällöin noin 90 % NO_x:sta ja yli 80 % NO₂:sta voi olla raskaista kaupunkiajoneuvoista peräisin. Katuvarsilla, missä kevyt ajoneuvoliikenne (LD) on hallitsevaa, esim. 96-98 %, kevyet ajoneuvot ovat tasapäinen tai jopa suurempi suoran NO₂:n päästölähde ilmaan kuin bussit ja kuorma-autot. Myös NO_x–päästöt ovat lähellä toisiaan eri autoryhmissä. Henkilöautokannan keskimääräinen NO₂/NO_x–suhde todellisessa kaupunkiajossa on kuitenkin merkittävästi HD–ajoneuvoja suurempi, johtuen pääasiassa viimeaikaisesta dieselhenkilöautokannan osuuden kasvusta uusimmilla, runsaammin NO₂–päästöä tuottavilla autoilla. Keskipakaisen, uusinta tekniikkaa edustavan, hiukkas-suodattimella varustetun henkilöauton suora NO₂–päästö oli yhtä suuri kuin ilman pako-kaasun jälkikäsittelylaitteita olevan, 2005–vuosimallisen Euro III–päästötasonussin.

SCR-tekniikkaa on yleistynyt Euroopassa raskaiden ajoneuvomoottoreiden typen oksidien päästöjen rajoittamiseksi. Joissakin tapauksissa SCR-tekniikka ei kuitenkaan toi-

minut toivotulla tavalla tässä mitatuissa ajoneuvoissa (kuva 10.2): Toimiessaan se kuitenkin alentaa tehokkaasti sekä NO_x:a että NO₂:a pakokaasuista, mikä luonnollisesti tulee vaikuttamaan typen oksidien tuoton –suhteeseen keveiden (LD) ja raskauden ajoneuvojen (HD) välillä. Päinvastaiseen suuntaan saattaa vaikuttaa HD -kehitys Euro 6 –vaiheessa, jolloin DPFF ja niiden mahdollisesti mukanaan tuomat suuret NO₂ –päästöt yleistyvät. n NO₂ päästön rajoittamista HD –moottoreista harkitaan Euro 6 –vaiheessa.

Johtopäätöksiä

Kasvaneisiin NO₂–lähipäästöihin vaikuttavat raskaasta ajoneuvokannasta eniten uudet, tehokkaalla hapettavalla jälkikäsitteilylaitteella (DOC) varustetut ajoneuvot. Myös monet hiukkassuodatinratkaisut ovat hapettavia katalysaattoreita. Etenkin ne, joissa noen suodatinregeneraatioissa käytetään NO₂:ia. NO₂ muodostetaan katalyyttisesti NO:sta esihapettimessa tai sitä muodostuu (Pt-)katalysoidun suodattimen pinnalla. NO₂:n etuna hapettimena on matala nokisuodattimen regeneraatiolämpötila.

Ongelmallisia suorien NO₂–päästömäärien kannalta olivat myös bussien uudet SCR + DPF –yhdistelmät. Tämä on osittain osoitus siitä, että pakokaasupäästölainsäädäntö ei toistaiseksi sisällä mitään rajoitusta suorasta NO₂:sta, vaan ainoastaan typen oksidien kokonaismäärästä. Osittain se kertoo näiden 'tulevaisuuden' jälkikäsitteilytekniikoiden valmiusasteesta. Uusimpiin pakokaasumääräyksiin (Euro VI) on kuitenkin jo tehty varaus joko NO₂/NO_x -suhteen tai NO₂-päästön rajoittamiselle, mikä toteutuessaan parantaa tilannetta pitkällä aikavälillä.

Tulosten perusteella näyttää siltä, että EGR:stä tai laihemmasta palamisoseksesta johtuvat alentuneet palamislämpötilat lisäävät NO₂ -muodostusta pakokaasuun.

Raskaan kaupunkiajoneuvoliikenteen NO_x:sta arviolta 10 % ja kevyiden ajoneuvojen NO_x:sta n. 19 % on tänä päivänä suoraa NO₂:ia, ajosuoritteet huomioituna.

Raskaiden dieselmoottoreiden NO_x –ominaispäästöt ovat hyvin korkeat verrattuna henkilöautodieselmoottoreiden vastaaviin. Ne ovat noin 3-5 –kertaiset polttoaineenkulutuseroihin verrattuna. Nykyään uudet HD–moottorit ovat myös monessa tapauksessa optimoitu PM-vähennykseen, ja korkea NO_x poistetaan jälkikäsitteilyteknisesti.

Raskaissa ajoneuvoissa käytettyjen pakokaasun puhdistustekniikoiden joukossa NO₂- ja NO_x -päästöjen vähennyksen kannalta parhaita, kypsiä jälkikäsitteilyratkaisujakin näyttäisi jo olevan: hyvin toimivia SCR –katalyytteja (ainakin uusina) sekä vakiintuneita kolmitoimikatalysaattoriratkaisuja stoikiometrisiin maakaasubusseihin. Molemmissa sekä typen oksidien kokonaispäästö että suoran NO₂-päästön osuus ovat molemmat pieniä.

10.3 LINJA-AUTOJEN SÄÄNTELEMÄTTÖMÄT PÄÄSTÖT

10.3.1 Yleistä

Sääntelemättömiä päästöjä mitattiin seuraavista kuudesta kaupunkilinja-autosta:

- Scania Euro III-päästötason ajoneuvo (vm. 2002)
- Scania Euro IV-päästötason ajoneuvo (vm. 2006)
- Scania EEV-päästötason ajoneuvo (vm. 2008)
- Volvon EEV-päästötason ajoneuvo (vm. 2008)
- CNG - Lean Mix. MAN. EEV-päästötason , 3 – akselinen. ajoneuvo (vm. 2006)
- CNG - stoichiometric. MAN EEV-päästötason ajoneuvo (vm. 2007)

Erikoismittauksissa analysoitiin seuraavat pakokaasukomponentit:

Kaasufaasi:

- hiilivetyerittely $C_1 - C_8$ -yhdisteille (tolueeni) (GC)
- aldehydit (DNPH -näytteenotto, HPLC)
- ammoniakki NH_3 (FTIR)

Hiukkasfaasi:

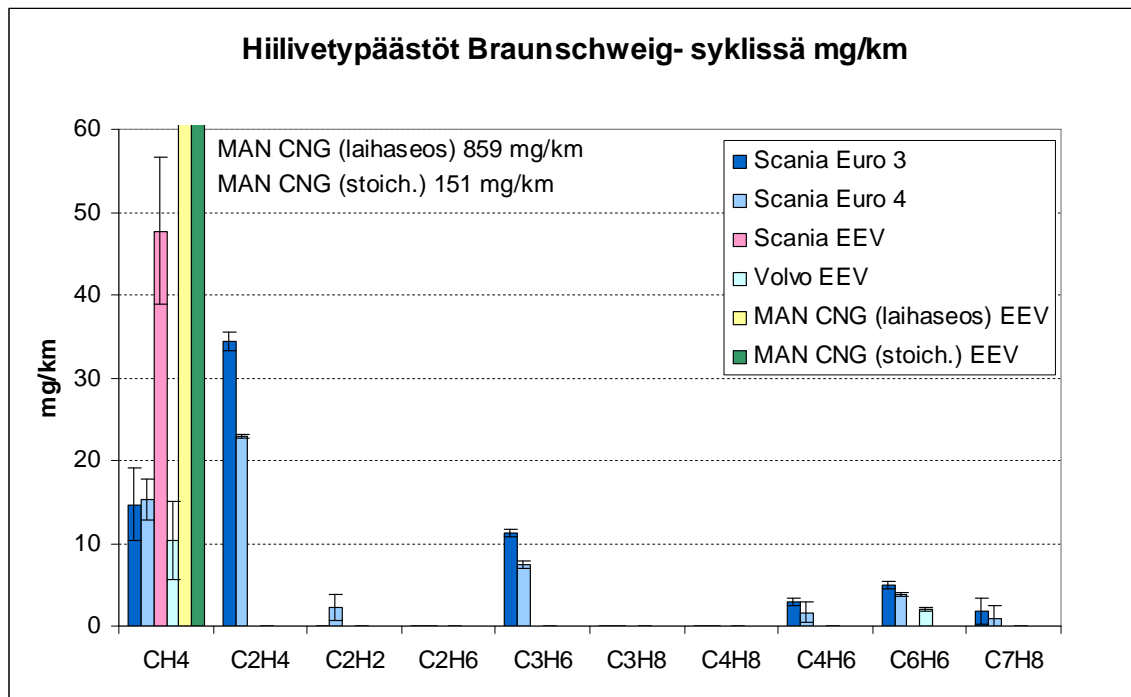
- hiukkasten lukumääräjakaumat ja kokonaislukumäärä (ELPI)
- PAH-analyysi hiukkasmassasta (polyaromaattiset hiilivety-yhdisteet)
- Ames-testi hiukkasmassalle (hiukkasten mutageenisuus)

10.3.2 Hiilivety päästöt

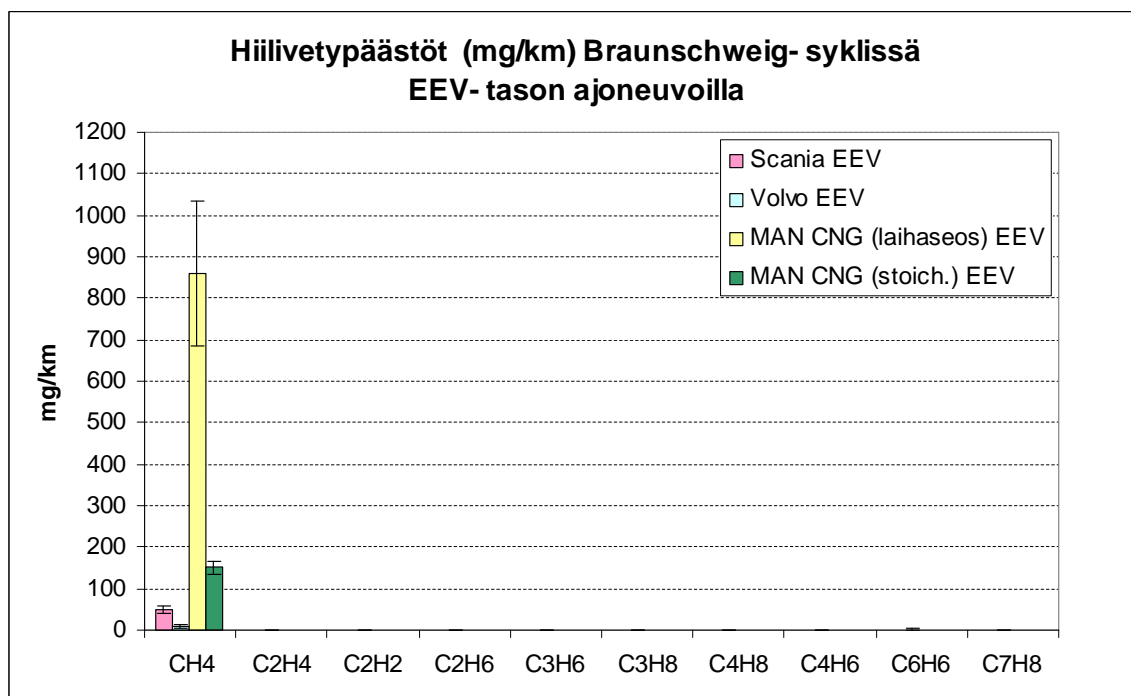
Hiilivetyanalyysissä määritettiin kaasukromatografilla 10 eri hiilivety-yhdistettä: metaani, eteeni, asetyleeni, etaani, propeeni, propaani, isobuteeni, 1,3-Butadieeni, bentseeni ja tolueeni. Kuvassa 10.3. on esitetty hiilivety määrityksen tulokset yksikkönä mg/km eri ajoneuvoilla.

Tulosten perustella havaitaan, että maakaasuautoilla hiilivety päästöt koostuvat yksinomaan metaanista.

Maakaasu/metaanimootoreita on sekä laihaseos- että stoikiometrisellä seossäädöllä. Laihaseostekniikalla metaanipäästö on moninkertainen verrattuna stoikiometriseen moottoriin. Tämä havainnollistuu kuvassa 10.4., jossa on esitetty vain EEV-tasoisten ajoneuvojen hiilivety päästöt Brauschweig-syklissä. Euro III- ja Euro IV-tasoisten perusdieselajoneuvojen pakokaasujen hiilivetyerittelyn tulos on hyvin samankaltainen havaittujen komponenttien ja pitoisuustasojen osalta. Molemmilla ajoneuvoilla havaitaan pakokaasussa metaania, eteeniä, propeenia, 1,3-butadieeniä, bentseeniä ja tolueeniä. Scania EEV-ajoneuvolla metaanipäästö on kolmikertainen Euro III- ja Euro IV-tason ajoneuvoihin verrattuna, ja viisinkertainen verrattuna Volvon EEV-ajoneuvoon. Volvon EEV-ajoneuvolla metaanipäästö on dieselajoneuvoista pienin ja on jopa dieseltekniikalle ominaisella tasolla (alle 20 mg/km). Volvon EEV-ajoneuvolla havaittiin kuitenkin myös mitattava pitoisuus bentseeniä.



Kuva 10.3. Hiilivety päästöt (g/km) eri ajoneuvoilla Braunschweig- syklissä.

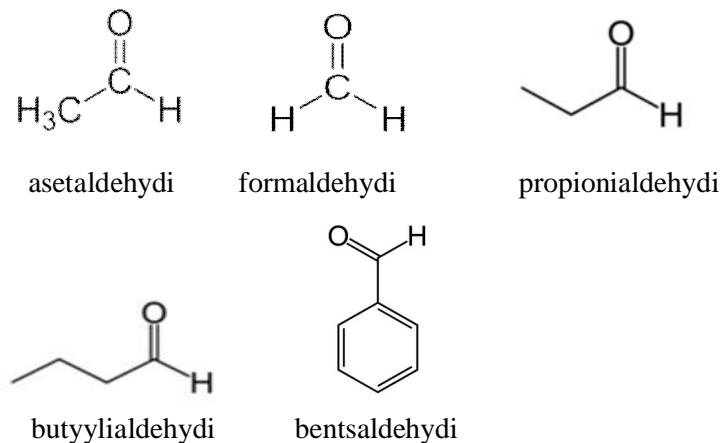


Kuva 10.4. Hiilivety päästöt (g/km) EEV- ajoneuvoilla Braunschweig-syklissä.

10.3.3 Karbonyyliyhdisteet

Laimennetusta pakokaasusta kerättiin näytteet siten, että sopivalla näytevirralla pakokaasu reagoi DNPH- patruunoiden kanssa. Patruunat uutettiin testin jälkeen asetonitriilillä. Ennen näytteiden analysointia uutteesta tehtiin 1:1 laimennos veden kanssa. Yhteensä 10 karbonyyliyhdisteen pitoisuus analysoitiin nestekromatografiatekniikalla (HPLC). Analysoidut yhdisteet olivat: formaldehydi, asetaldehydi, akroleiini, propionaldehydi, krotonaldehydi, butyyialdehydi, bentsaldehydi, valeryyaldehydi, m-toluualdehydi, heksanaali. Karbonyyliyhdisteiden terveysvaikutukset ilmenevät yleisimmin silmien ja hengitysteiden ärsytysoireina. Näistä tutkituista aldehydeista suurimpina pitoisuuksina havaitaan yleensä formaldehydiä ja asetaldehydiä. Dieselpakokaasuissa voi esiintyä lisäksi propinoni-, butyyli ja bentsaldehydejä, joiden pitoisuus jää kuitenkin alle 0,3 ppm:aan. Formaldehydi aiheuttaa asetaldehydiä pienimmillä pitoisuuksilla (2-4 ppm) silmien kirvelyä ja hengitysteiden limakalvojen ärsytysoireita (Työterveyslaitos/OVA-ohjeet) ja lisäksi IARC (IARC 1989) ja NIOSH (NIOSH 1995) ovat todenneet formaldehydin voimakkaasti karsinogeeniksi. NIOSH:in mukaan lyhytaikaisenkin altituksen (15 min) ns. STEL-raja (Short Term Exposure Limit) on vain 2 ppm. Ilmaan joutunut formaldehydi hajoaa suoraan valon vaikutuksesta ja sen puoliintumisaikaksi on saatu 2 - 6 tuntia.

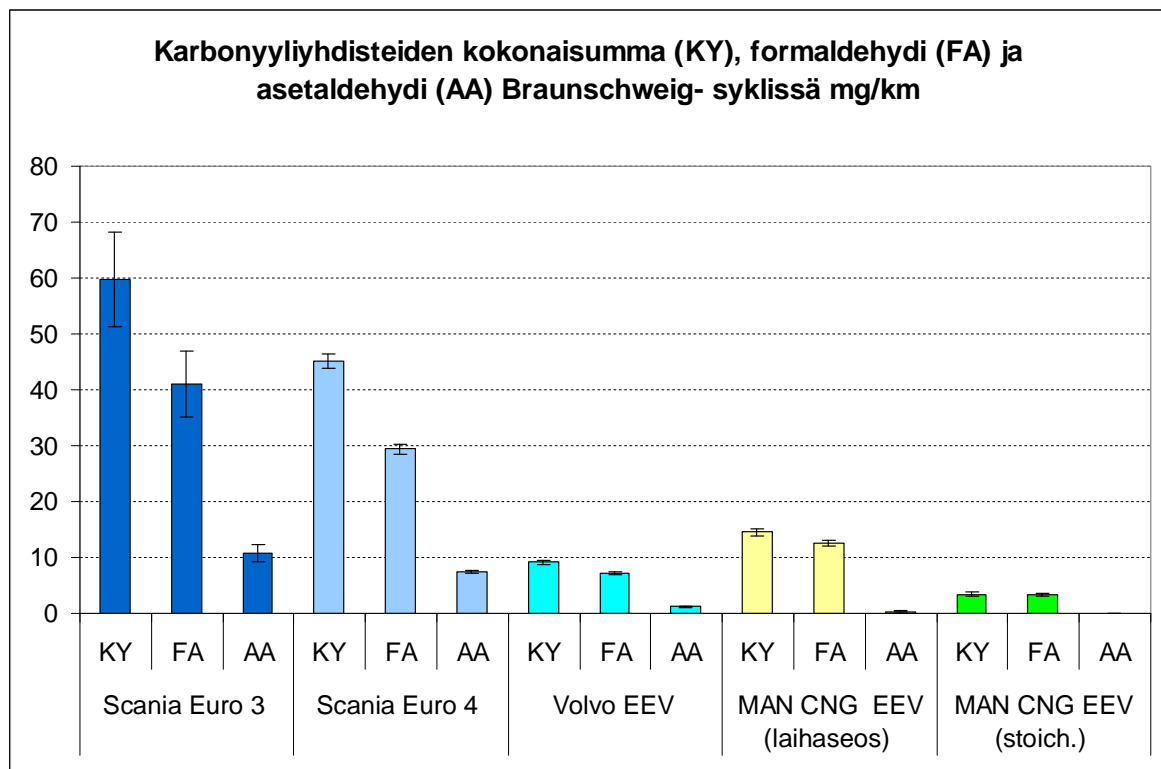
Kuvassa 10.5. on esitetty yleisimpien karbonyyliyhdisteiden kemiallisia kaavoja.



Kuva 10.5. Karbonyyliyhdisteiden rakennekaavoja (Lähde:Wikipedia).

Kuvassa 10.6 on esitetty karbonyyliyhdisteiden kokonaispitoisuus (10 karbonyyliyhdisteen summa) sekä formaldehydi- ja asetaldehydipäästöt tutkituilla ajoneuvoilla. EEV-tasoisella Scanialla ei saatu määritettyä karbonyyliyhdisteitä, koska kaikki DNPH-reagenssi oli kulunut kokeen aikana. Tämä aiheutuu siitä, että Scaniassa on tehokas hapettava katalysaattori, jonka tuottama korkea NO₂-pitoisuus kuluttaa näytepatruunan reagenssin.

Aikaisemmissa VTT:n tutkimuksissa (Erkkilä et al. 2007) on todettu hapetuskatalysaattorilla varustetun Euro III-dieselbussin formaldehydi- ja asetaldehydipäästöjen olevan n. 50 % ilman katalysaattoria olevaan bussin päästöistä. Scanian Euro IV- ja Euro III-ajoneuvoilla karbonyyliyhdisteiden pitoisuuksissa ei ole suurta eroa. Karbonyyliyhdisteiden kokonaispitoisuus ja aldehydipitoisuudet pienenevät siirryttäessä Euro III-tasosta EEV tasoon systemaattisesti. EEV-tasoisella ajoneuvolla karbonyyliyhdisteiden kokonaissumma muodostuu lähes 100 %:sesti formaldehydistä ja asetaldehydistä.



Kuva 10.6. Karbonyyliyhdisteiden kokonaissumma sekä formaldehydi- ja asetaldehydipäästöt Braunschweig- syklissä.

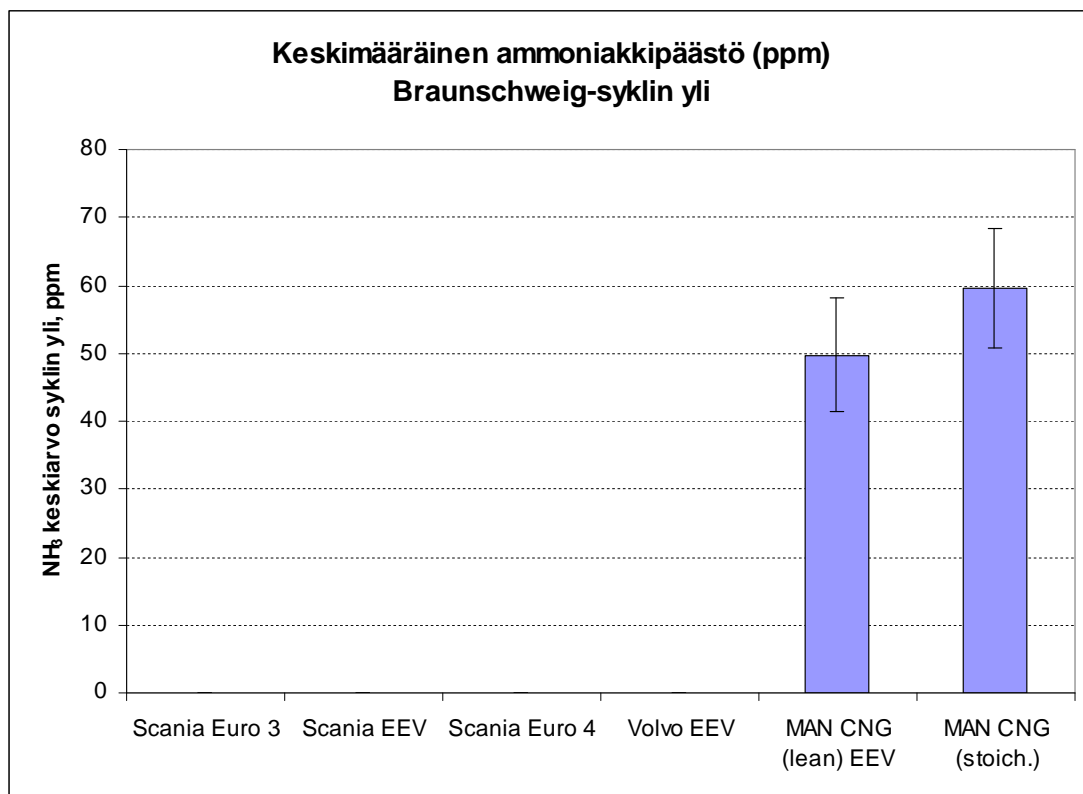
Karbonyyliyhdisteiden kokonaispitoisuus ja formaldehydipäästö ovat laihaseosmaakaasuautolla moninkertaisesti suuremmat kuin stoikiometrisella maakaasuautolla. Stoikiometrisellä maakaasuautolla karbonyyliyhdisteiden kokonaissumma muodostuu lähes kokonaan formaldehydistä. Vaikka kahden eri ajoneuvon välillä erot ovat suuria, niin laihaseos-maakaasuautonkin formaldehydipäästö on varsin pieni eli vastaa 1,2 ppm pakokaasussa. Vaikkakin havaitut karbonyyliyhdisteiden pitoisuudet ovat alhaisia molemmilla maakaasuautoilla, niin havaittu taso on korkeampi aikaisempiin IANGV-projektissa vuonna 2004 tehtyihin mittauksiin verrattuna (aikaisemmin FA ja AA nollatasolla). Laihaseos maakaasuauton päästöt ovat nousseet yli diesel-EEV- ajoneuvon tason. Huomioitavaa on, että IANGV-projektissa vuonna 2004 tutkittujen eri merkkiä edustavien laihaseos- ja stoikiometristen maakaasuajoneuvojen ajokilometrikertymä oli

alle 50 000 km. Nyt tutkittujen ajoneuvojen osalta kilometrikertymä oli stoikiometrisellä autolla mittausten aikaan n. 206 000 km ja laihaseosautolla n. 307 000 km.

10.3.4 Ammoniakkipäästö

Ammoniakkipäästöt mitattiin jatkuvatoimisesti Braunschweig-syklin aikana Gasmeter FTIR-laitteella.

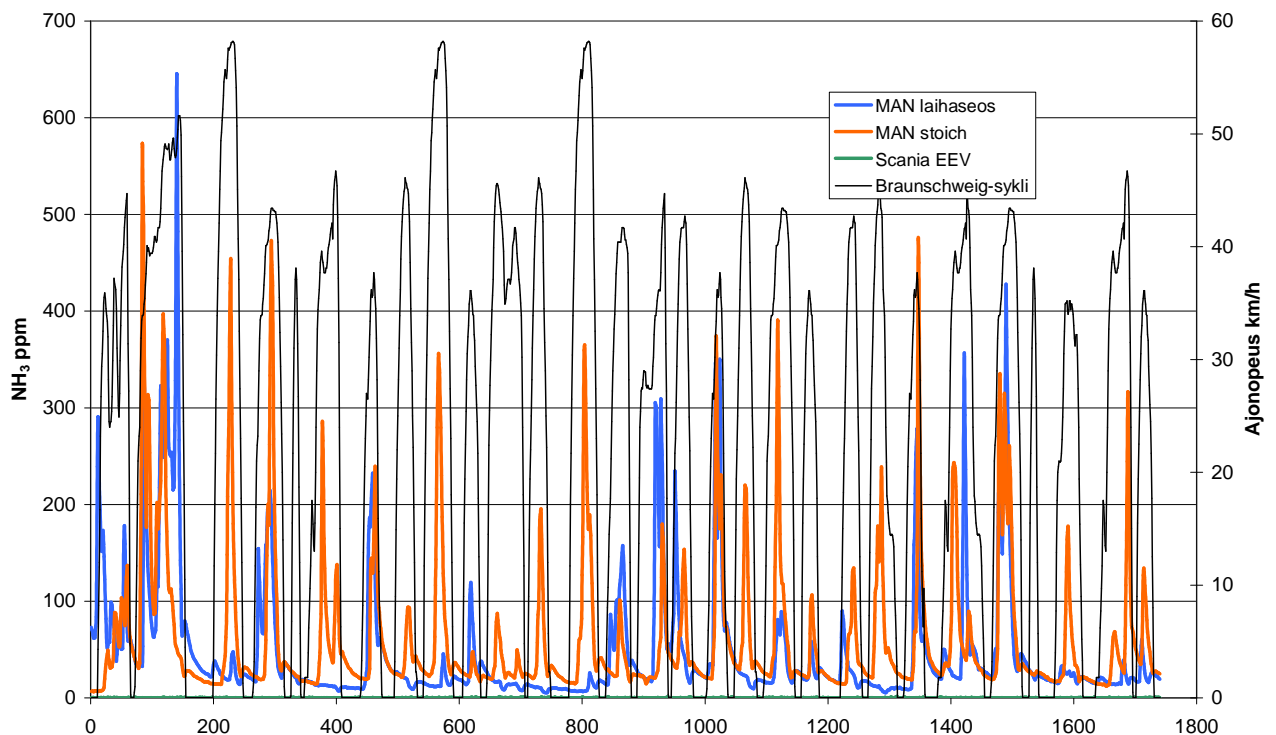
Ammoniakin osalta lyhytaikaiselle altistukselle on EU- tasolla määritetty indikatiivinen altistusraja (Indicative Occupational Exposure Limit, IOELV), joka on 50 ppm/15 min. Tämä on sama kuin ns. HTP-arvo (työpaikan ilmassa haitalliseksi tunnettu pitoisuus). USA:ssa on määritelty erilaisia altistuksia kuvaamaan myös ns. IDLH-arvo (Immediately dangerous to life and health, USA), missä ammoniakkialtistuksen akuutille toksisuudelle on asetettu rajaksi pitoisuus 300 ppm /30 min.



Kuva 10.7. Keskimääräinen ammoniakkipitoisuus (ppm) eri ajoneuvoilla Braunschweig- syklissä.

Kuvassa 10.7 on esitetty keskimääräinen ammoniakkipitoisuus eri ajoneuvoilla raakapakokaasussa Braunschweig-syklissä. Stoikiometrisellä tekniikalla varustetulla maakaasubussilla ammoniakkipäästö oli keskimäärin 60 ppm Braunschweig-syklissä, ja laihaseostekniikalla keskimäärin 50 ppm. Dieselajoneuvoilla ei mitattu havaitsemisrajan (3 ppm) ylittäviä ammoniakkipitoisuuksia.

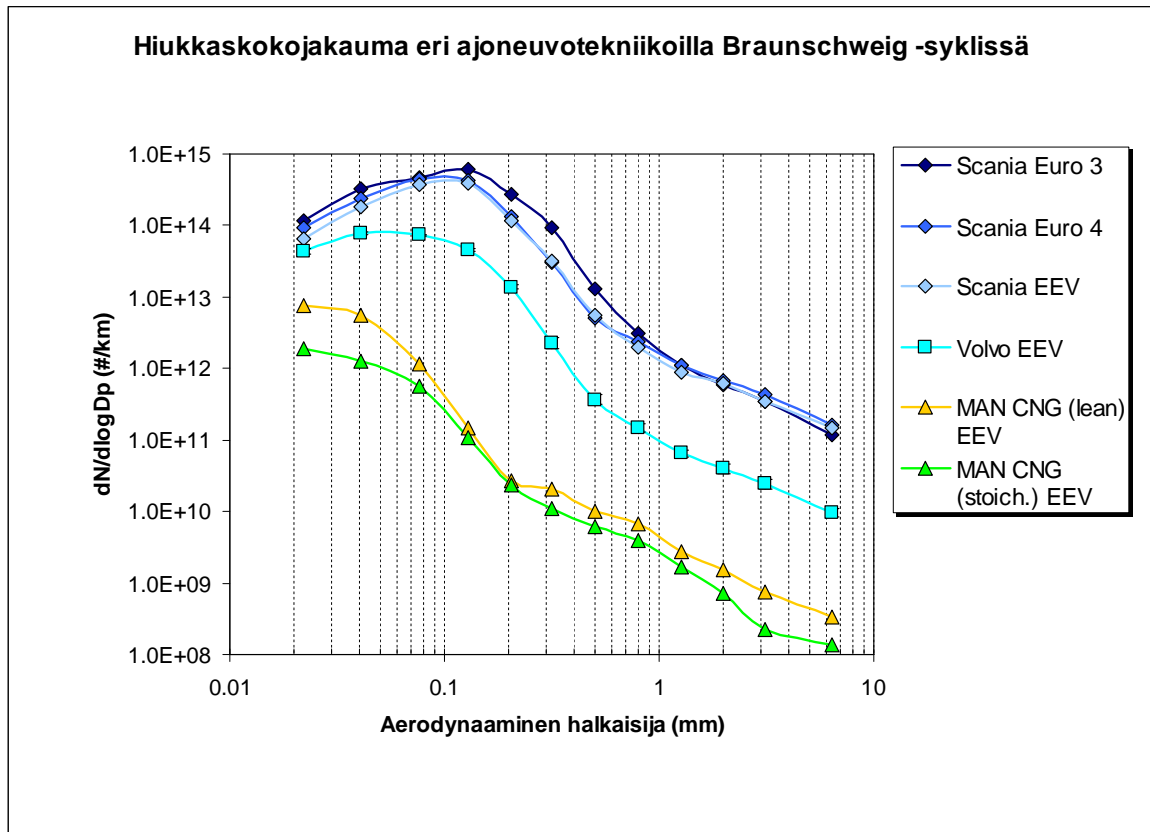
Kuvassa 10.8. on esitetty EEV-tasoisten ajoneuvojen ammoniakkipäästö jatkuvassa FTIR-mittauksessa Braunschweig-syklissä. Kuvaa tarkasteltaessa havaitaan, että maakaasuautojen ammoniakkipäästö noudattelee tiettyä syklin kuormituksesta johtuvaa säännönmukaisuutta. Stoikiometrisellä maakaasuautolla havaitaan laihaseosmaakaasuautosta poiketen enemmän ammoniakkipiikkejä. Tästä aiheutuen stoikiometrisen maakaasuauton keskimääräinen ammoniakkipäästö on suurempi. Tämän on havaittu myös aiemmissa VTT:n tutkimuksissa, joissa on arveltu ilmiön liittyvän ajoneuvojen katalyysaattoritekniikkaan. Scanian EEV-tasoisella dieseltekniikkaan perustuvalla ajoneuvolla ei havaita syklin aikana ammoniakkia.



Kuva 10.8 Ammoniakkipäästö eri ajoneuvoilla Braunschweig- syklissä.

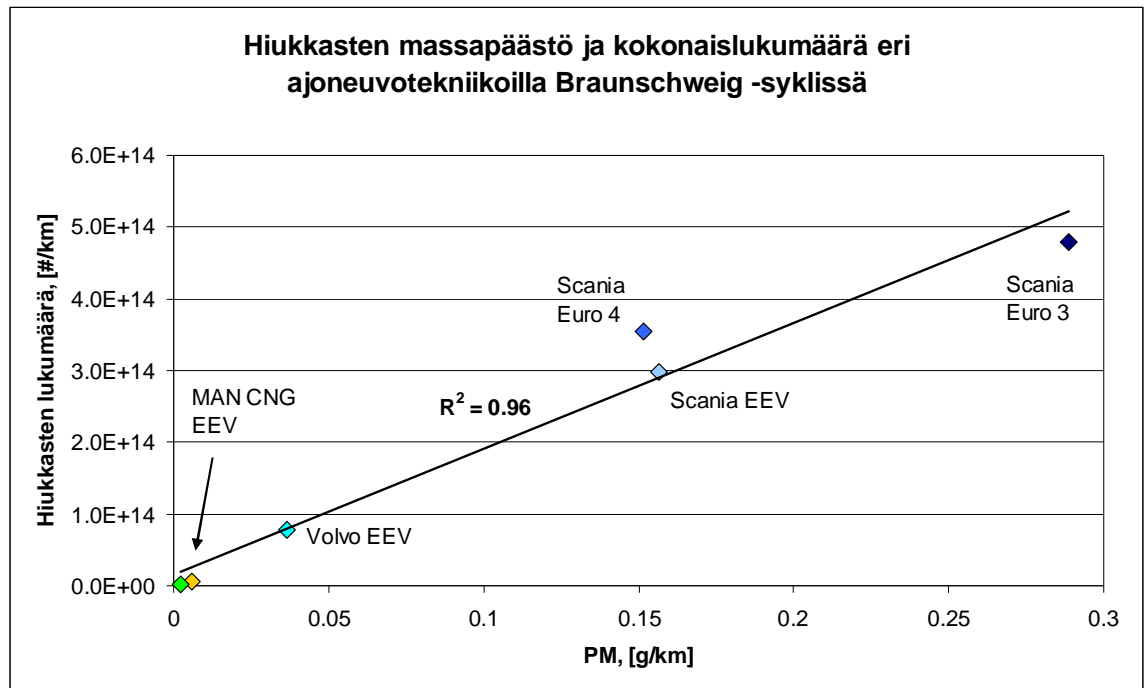
10.3.5 Hiukkasten koko ja lukumäärä

Hiukkaskokojakaumat ja kokonaislukumäärä mitattiin ELPI- mittalaitteella. Mittalaite luokittelee alipaineimpaktorissa hiukkaset eri kokoluokkiin aerodynaamisen halkaisijan mukaan. Pakoputkesta imetty näyte laimennettiin kahdessa vaiheessa siten, että primäärilaimentimena käytettiin huokoisen putken laimenninta ja sekundäärilaimentimena ejektorilaimenninta. Todellinen laimennussuhde määritettiin mittaamalla laimentamattoman pakokaasun ja laimennetun näytteen CO₂ -pitoisuudet. Kuvassa 10.9 on esitetty kaikkien kuuden ajoneuvon hiukkaskokojakaumat.



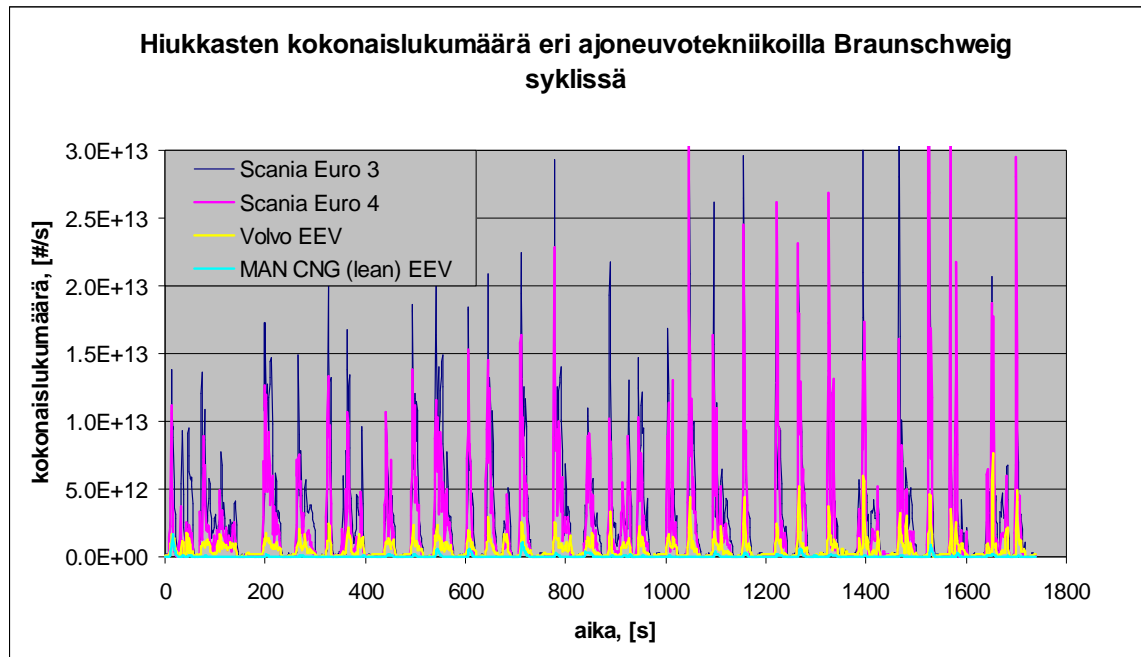
Kuva 10.9 Hiukkaskokojakaumat eri kaupunkibussilla Braunschweig-syklissä. Y-akselin asteikko on logaritminen.

Kuva havainnollistaa hyvin eri ajoneuvotekniikoiden väliset erot hiukkasten lukumäärissä. Erot korreloivat myös suoraan hiukkasten massapäästöön ja kokonaislukumäärään (kuva 10.10). Kaasuajoneuvojen lukumäärät eri kokoluokissa ovat karkeasti 1-3 kertaluokkaa pienemmät verrattuna Euro III -päästöluokan ajoneuvoon. Euro IV ja EEV ajoneuvojen hiukkaspäästöt ovat keskenään samansuuruisia ja hieman alemmat kuin Euro III ajoneuvolla. EEV 2 -ajoneuvon hiukkaspäästöt ovat keskimäärin yhtä kertaluokkaa pienemmät verrattuna Euro III -ajoneuvoon. Euro III -ajoneuvolla kokojakauman huippu sijoittuu 129 nm:iin ja siirryttäessä puhtaampiin tekniikoihin kokojakauman huippu siirtyy pienempiin hiukkaskokoihin.



Kuva 10.10. Hiukkasten kokonaislukumäärä suhteessa hiukkasmassapäästöön eri ajoneuvotekniikoilla.

Kuvassa 10.11 nähdään kuinka hiukkasten kokonaislukumäärä muuttuu Braunschweig-syklin aikana. Kuvasta on selkeyden vuoksi jätetty toinen EEV- ja CNG –ajoneuvo pois. Kaikilla ajoneuvoilla ilmenee kiihdytysten aikana piikkejä hiukkaslukumäärissä. Hiukkaslukumäärät ovat selkeästi korkeimmat Euro III ja Euro IV –ajoneuvoilla. Kaasuajoneuvon hiukkastasot ovat erittäin alhaisia kaikissa ajotilanteissa.



Kuva 10.11. Hiukkasten kokonaislukumäärä eri ajoneuvotekniikoilla Braunschweig – syklin aikana.

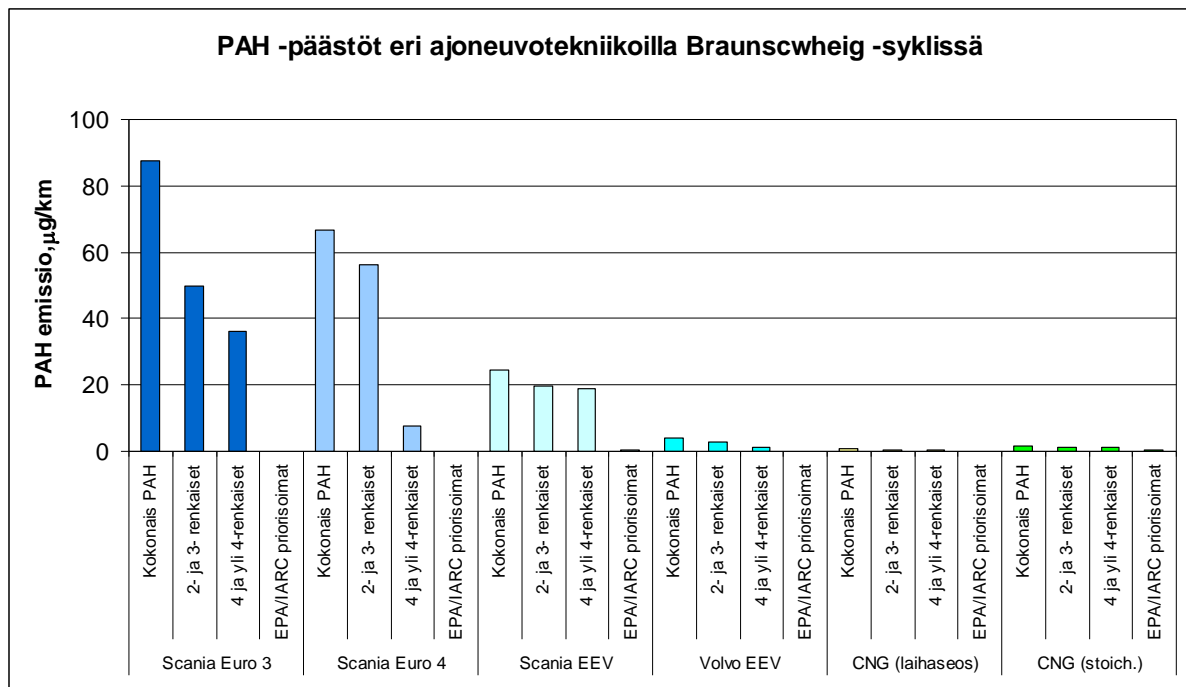
10.3.6 PAH –päästöt

Kuvassa 10.12. on esitetty kooste erilaisten PAH – yhdisteiden päästömääristä. Yhdisteistä 2 – 3 –aromaattirenkaiset ovat vähemmän haitallisia yhdisteitä ja yli 4 -renkaiset ovat tunnetusti syöpävaarallisia yhdisteitä. Lisäksi kuvassa on esitetty kaikkein analysoitujen PAH- yhdisteiden summa. EPA/IARC- kategoria perustuu nykyään kahdeksaan kansainvälisen syöpätutkimusjärjestön IARC:n (International Agency for Research on Cancer) ja Yhdysvaltojen ympäristöviranomaisen EPA:n listaamaan syöpävaaralliseksi tiedettyyn tai epäiltyyn PAH –yhdisteeseen (priority PAH compounds):

- bents(a)antraseeni
- bentso(b)fluoranteeni
- bentso(k)fluoranteeni
- bentso(a)pyreeni
- dibentso(a,h)antraseeni
- indeno(1,2,3-cd)pyreeni
- kryseeni
- 7,12 -dimetyylibents(a)antraseeni (lis. v.2006)

Viimeistä yhdistettä on VTT:ssä analysoitu v. 2006 lähtien, ja se sisältyy Mobile Source Air Toxics -luetteloon (MSAT, EPA 2000).

Kuvassa 10.12. on esitetty PM- päästön PAH- yhdisteiden summat. Tuloksia tarkastellessa havaitaan, että hiukkasten sisältämien PAH- yhdisteiden sekä kokonaismäärät että PAH- yhdisteiden koostumus muuttuvat radikaalisti ajoneuvotekniikan muuttuessa siten, että Euro III- tekniikan dieselajoneuvolla kokonais- PAH- pitoisuus on suurin ja EEV- tekniikalla pienin. Siirtyminen Euro III- tasosta Euro IV- tasoon saman valmistajan ajoneuvolla näkyy yli 4 renkaisten PAH- päästöjen selkeänä vähenemisenä, vaikka kokonais- PAH- pitoisuudessa ei havaita yhtä radikaalia muutosta. Vaikka EEV- tasoisella dieselajoneuvolla päästiin PAH:ien osalta hyvin pieniin pitoisuuksiin, niin molemmilla EEV- tasoisilla kaasuautoilla PAH- päästöt olivat vielä alhaisemmalla tasolla.



Kuva 10.12. PAH emissio eri tekniikoita edustavilla ajoneuvoilla (Braunschweig –sykli)

10.3.7 Hiukkasten mutageenisuus

Hiukkasten mutageenisuutta tutkittiin Ames– testillä. Kiinteille pakokaasuhiukkasille ja tietyin varauksin myös puolihihihtuville yhdisteille voidaan tehdä mutageenisuutta mittaavia kokeita, josta yksinkertaisin on Ames– bakteerikoe. Nitro-PAH –yhdisteet ovat suoraan vaikuttavia mutageeneja, ja ne reagoivat *Salmonella typhimurium* testisoluisissa ilman metabolista aktivointia (TA98-S9). Metabolisen aktivoinnin avulla (+S9) avulla saadaan tyypillisesti aikaan lisävastetta välillisesti vaikuttavista ei-substituoiduista PAH– yhdisteistä (Maron & Ames 1983).

Ames -kokeen merkitys on viime vuosina huomattavasti vähentynyt ja sitä on alettu korvata vaativammilla mutta kuvaavammilla eläin- tai ihmisolukokeilla. Ames- kokeiden matriisi on kuvattu alla. Maakaasuajoneuvojen hiukkaspäästöt olivat niin matalia, että hiukkasmassaa ei saatu kerättyä riittävästi kaikkia bakteerikantoja varten.

bakteerikanta	Euro3	Euro4	EEV	EEV	CNG (laihaseos)	CNG (stoich.)
TA98 -S9	x	x	x	x	x	x
TA98 +S9	x	x	x	x	-	x
TA98NR -S9	x	x	x	x	-	-

Euro III-, molemmilla EEV- ja stoikiometrisella maakaasuajoneuvoilla havaittiin marginaalisesti suoraa mutageenisuutta kannalla TA98 –S9. Samoilla ajoneuvoilla ei havaittu mutageenisuutta kannalla TA98NR –S9, joten suora mutageenisuus on tulkittavissa nitro-PAH yhdisteiden aiheuttamaksi. Edellä mainituilla ajoneuvoilla havaittiin myös vähäisissä määrin epäsuoraa mutageenisuutta (kanta TA98 +S9). Kaikkien edellä mainittujen ajoneuvojen mutageenisuus vasteet olivat kuitenkin niin pieniä, että tuloksista ei voi vetää johtopäätöksiä eri ajoneuvotekniikoiden välille.

10.4 KUORMA-AUTOJEN EI-SÄÄNNELLYT PÄÄSTÖT

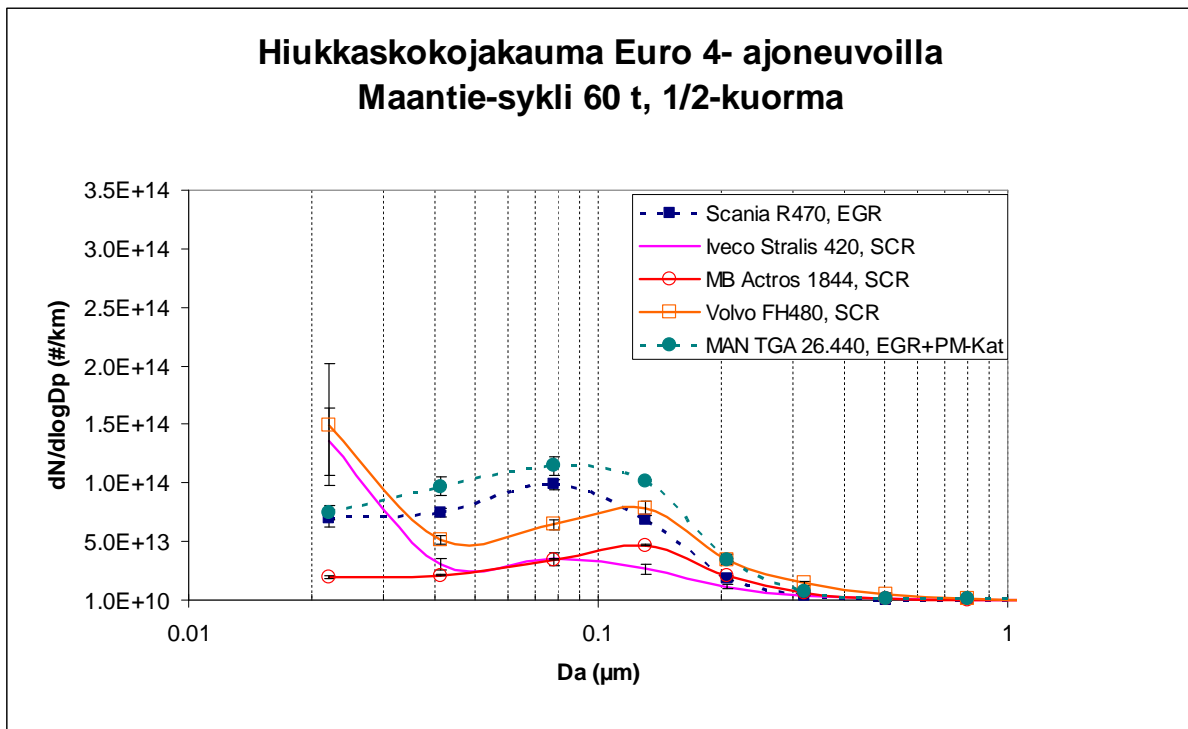
10.4.1 Yleistä

Kuorma-autoilla ei-säänneltyjen päästöjen mittaukset painottuivat hiukkasten koko- ja lukumääräjakauman mittauksiin. Lisäksi mitattiin vain ammoniakkipäästöjä, jotka voivat olla ajoittain korkeita SCR tekniikalla varustetuissa autoissa.

10.4.2 Hiukkasten koko ja lukumäärä

Hiukkaskokojakaumat ja kokonaislukumäärä mitattiin ELPI- mittalaitteella, mittaus on kuvattu edellä kohdassa 10.3.5.

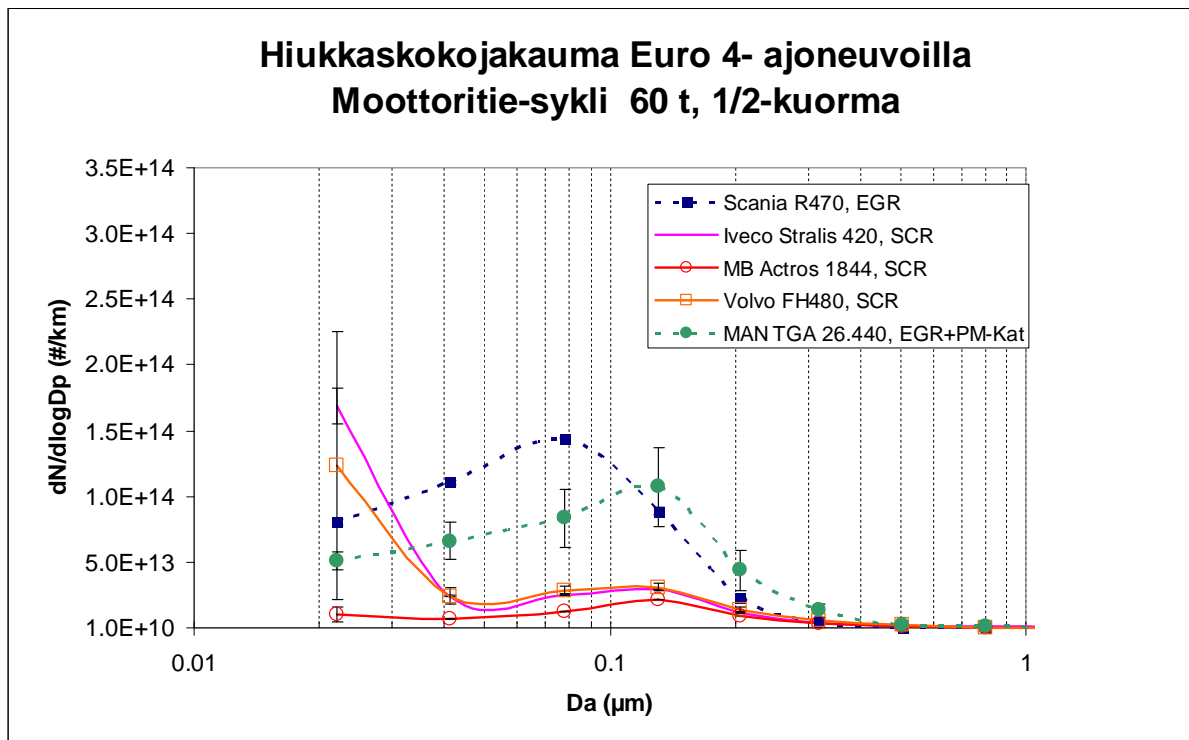
Kuvissa 10.13 – 10.18 SCR- tekniikkaa edustavien ajoneuvojen hiukkaskokojakaumat on merkitty yhtenäisillä viivoilla ja EGR-tekniikkaa edustavat ajoneuvot katkoviivoilla. Maantiesyklissä EGR- ajoneuvoilla 30 - 100 nm:n hiukkasten osuus on suurempi verrattuna SCR- ajoneuvoihin. SCR ajoneuvoilla (lukuun ottamatta MB Actros) alle 30 nm hiukkasten osuus on kuitenkin selkeästi suurempi, kuin EGR ajoneuvoilla (kuva 10.13).



Kuva 10.13. Hiukkaskokojakauma eri ajoneuvoilla Maantie- syklissä.

EGR- ajoneuvoilla (Scania ja MAN) ja SCR- ajoneuvolla (Iveco) kokojakauman akkumalaatiomoodin huippu sijoittuu noin 78 nm:iin, kun taas kahdella muulla SCR- ajoneuvolla (Volvo ja MB) se on noin 130 nm. Ivecolla ja Volvolla nanohiukkasten osuus on korkeampi kuin muilla ajoneuvoilla.

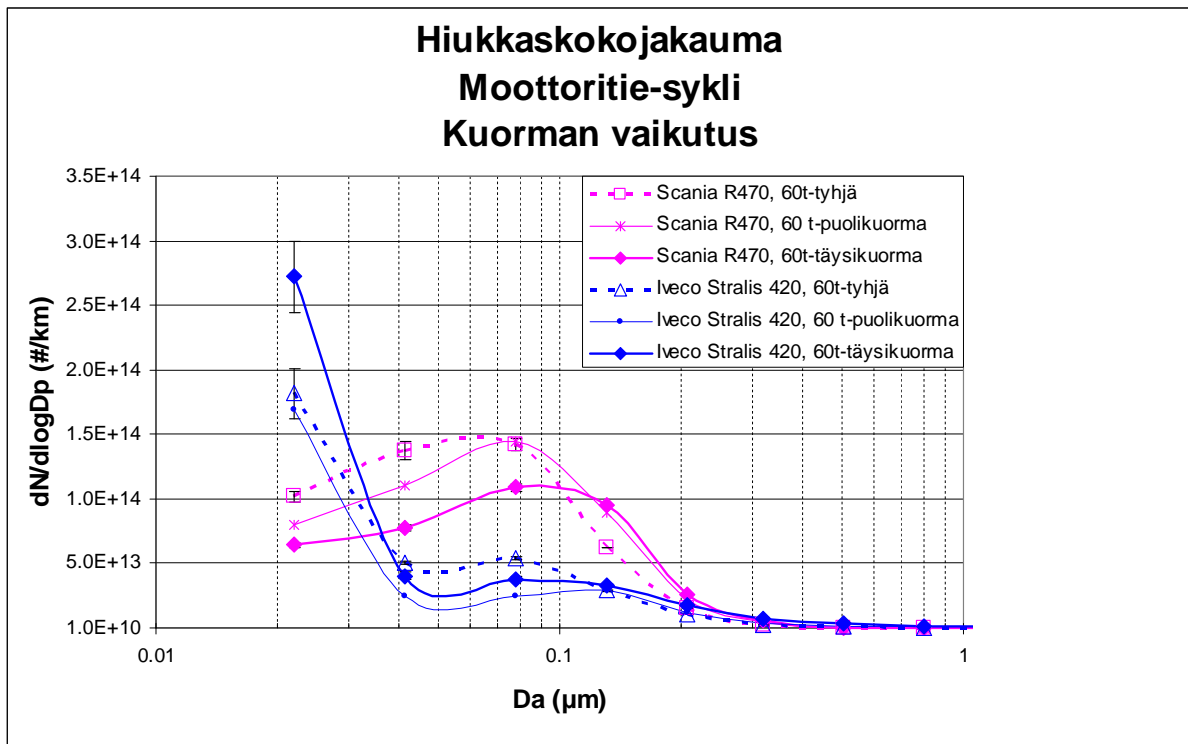
Kuvassa 10.14 on esitetty kaikkien viiden ajoneuvon hiukkaskokojakaumat moottoritie-syklissä. Jakaumat ovat pääpiirteissään samankaltaisia, kuin Maantie- syklissä mutta eri tekniikkaa edustavien ajoneuvojen väliset erot ovat suurempia. SCR-autojen hiukkaskokojakaumat ovat hyvin yhteneviä, lukuun ottamatta < 30 nm hiukkasten lukumääriä. Ivecolla ja Volvolla nanohiukkasten osuus on korkeampi kuin muilla ajoneuvoilla. Kyseisillä ajoneuvoilla akkumalaatiohiukkasten lukumäärä suhteessa nanohiukkasiin on selvästi pienempi, kuin Maantie- syklissä. Moottoritie- syklissä Scanian kokojakauman akkumalaatiomoodin huippu on noin 75 nm kohdalla, kun muilla ajoneuvoilla huippu sijoittuu noin 130 nanometriin.



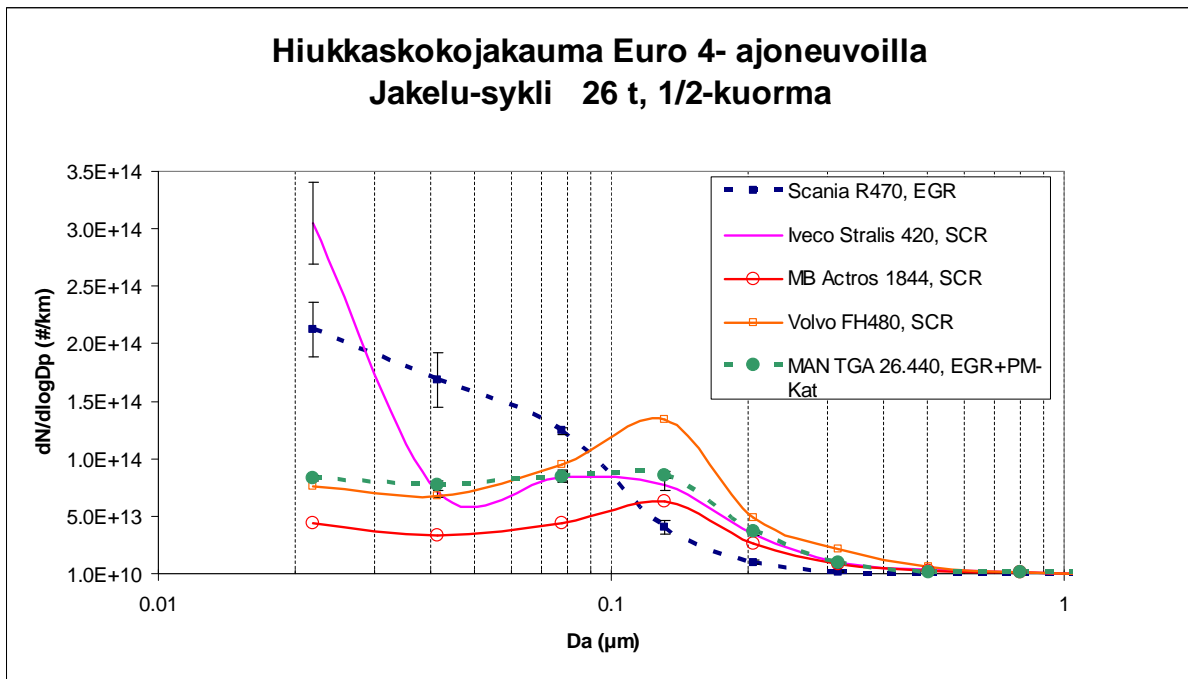
Kuva 10.14. Hiukkaskokojakaumat eri ajoneuvoilla Moottoritie- syklissä.

Moottoritie-syklissä haluttiin myös tutkia kuorman vaikutusta Scanian EGR- tekniikkaa ja Ivecon SCR- tekniikkaa edustavilla ajoneuvoilla. Molemmilla ajoneuvoilla tehtiin kaksi täydentävää mittausta täydellä kuormalla ja ilman kuormaa (tyhjä), perusmatriisin mittaukset oli tehty puolella kuormalla. Tulokset on esitetty kuvassa 10.15. Kokojakauman huipun paikka siirtyy molemmilla ajoneuvoilla korkeampaa kokoluokkaan verrattaessa täyden kuorman tilannetta tyhjään kuormaan. Vaikka akkumulaatiomoodin koko pienenee siirryttäessä tyhjältä kuormalta täydelle kuormalle, niin akkumulaatiomoodin paikan siirtyminen kohti suurempaa hiukkaskokoa aiheuttaa sen, että myös mitattu kokonaishiukkasmassa kasvaa molemmilla ajoneuvoilla. Scanialla puolella kuormalla alle 100 nm:n hiukkasten osuus asettuu tyhjän kuorman ja täyden kuorman puoleen väliin ja jakauman akkumulaatiomoodin paikka siirtyy hieman suurempaan hiukkaskokoon tyhjään kuormaan verrattuna. Ivecolla puolella kuormalla hiukkaskokojakauman muoto noudattaa täyden kuorman tilannetta, mutta alle 100 nm:n hiukkasten osuus on alhaisin.

Kuvassa 10.16 on esitetty kaikkien viiden ajoneuvon hiukkaskokojakaumat Jakelu- syklissä. Jakelu- syklin hiukkaskokojakauma kaikilla ajoneuvoilla poikkeaa Maantie- ja Moottoritie- sykleistä. Scanian kokojakaumassa nanohiukkaset ovat hallitsevia ja selkeää akkumulaatiomoodia ei ole. Volvon kokojakaumassa ei ole enää nähtävissä nukleatiomoodia. Merkittävää on myös se, että MAN:n ja Scanian hiukkaslukumäärät kokoluokassa 80-200 nm ovat hyvin lähellä SCR -ajoneuvoja, Scanialla hiukkasten lukumäärä yli 100 nm hiukkasissa on jopa alhaisin.



Kuva 10.15. Kuorman vaikutus hiukkaskokojakaumaan kahden eri tekniikan ajoneuvolla TRmoottoritie- syklissä.

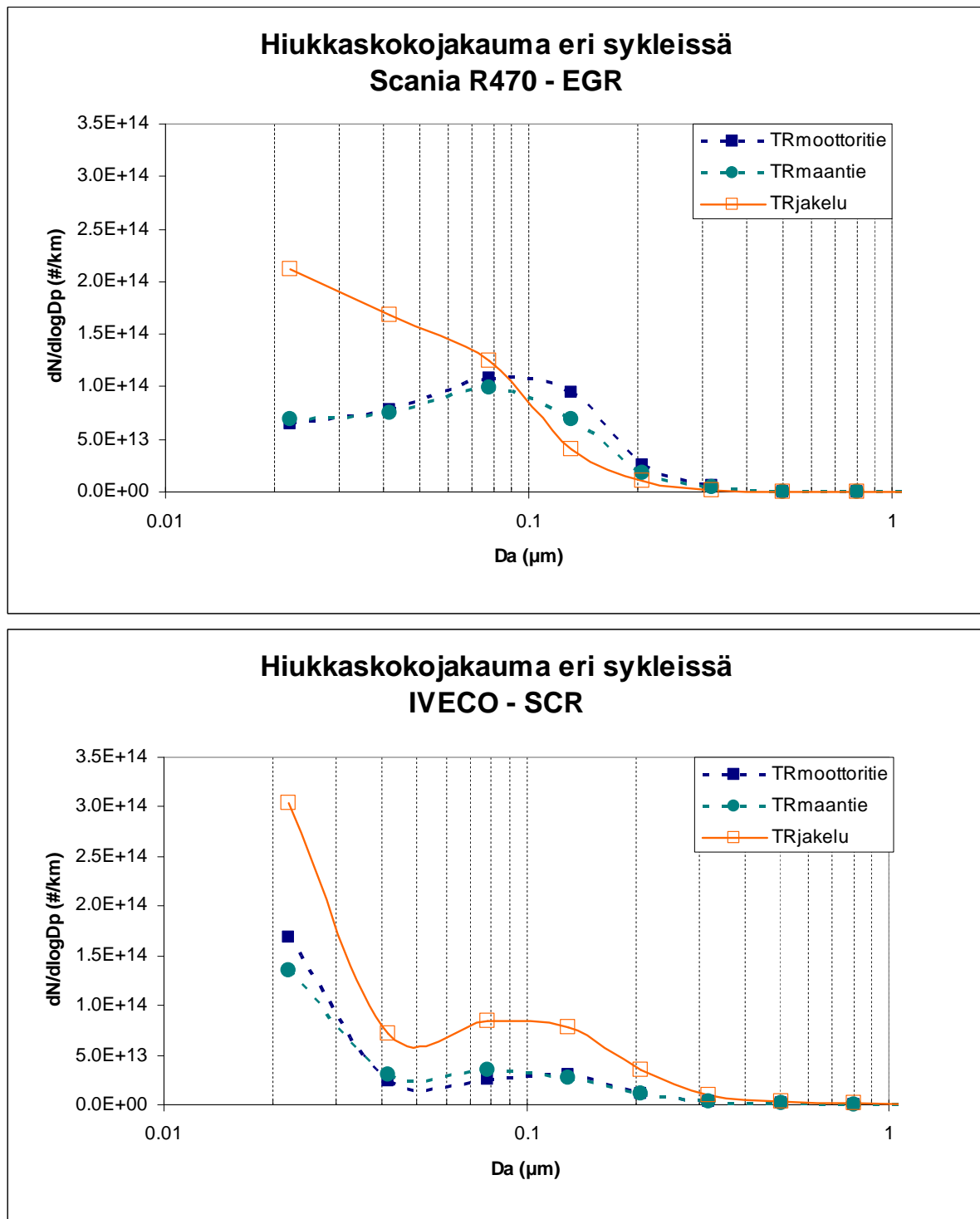


Kuva 10.16. Hiukkaskokojakaumat eri ajoneuvoilla Jakelu- syklissä.

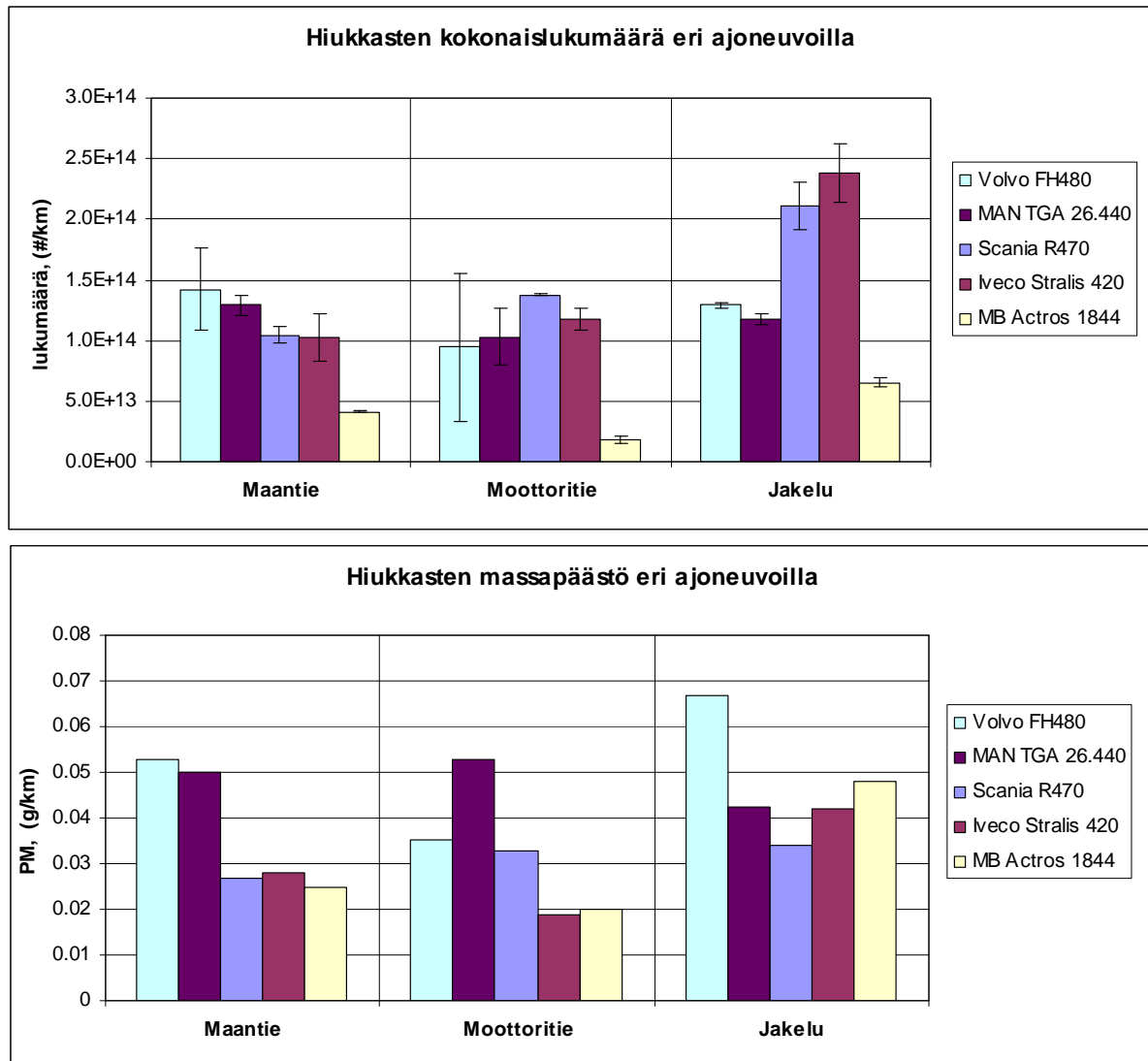
Syklin vaikutusta jakaumiin on helpointa tarkastella valitsemalla kaksi eri tekniikan ajoneuvoa, joilla jakauman muoto muuttuu radikaaleimmin ja tarkastella muutoksia näiden ajoneuvojen kesken. Kuvassa 10.17 on esitetty Scanian ja Ivecon hiukkaskokojakaumat eri sykleissä. Kuvan perusteella havaitaan, että maantie- ja moottoritiesyklarit jakaumat ovat lähellä toisiaan, sen sijaan Jakelu- syklarit jakaumat ovat muista sykleistä poikkeavia molemmilla ajoneuvoilla. Tämä voi johtua Jakelu-syklarin erilaisesta kuormitusasteesta. Siinä joutokäynnin osuus on suurempi kuin muissa sykleissä ja tämä johtaa etenkin haihtuvien hiukkasten lisääntymiseen. Ivecolla akkumulaatiomoodin koko ja nanohiukkasten määrä kasvaa, mikä voi johtua siitä, että SCR poistaa huonosti hiilivetyjä ja hiukkasia, joita syntyy joutokäynnin aikana ja tämä näkyy hiukkasemissiossa. Scanialla puolestaan EGR:n toiminnasta johtuen nokimoodi häviää ja haihtuvien hiukkasten osuus kasvaa.

Kuvassa 10.18. on esitetty hiukkasten kokonaislukumäärät ja massapäästöt eri ajoneuvoilla eri sykleissä. MB Actroksella hiukkasten kokonaislukumäärät olivat alhaisimmat kaikissa sykleissä. Scanialla ja Ivecolla muodostui Jakelu- syklarissa selkeästi enemmän hiukkasia kuin muilla ajoneuvoilla johtuen nanohiukkasten suuresta määrästä (kuva 10.17).

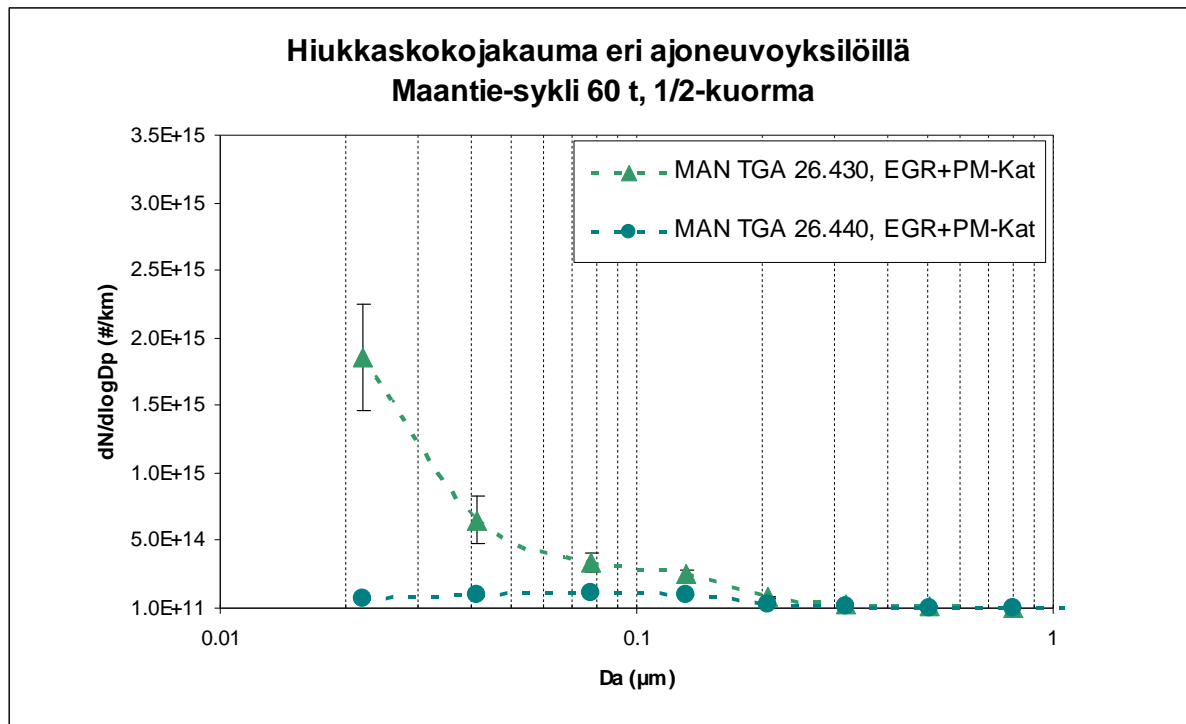
Mittausten aikana havaittiin, että MAN:in TGA 26.430 EGR- ajoneuvon kokonaishiukkaspäästö Maantie- syklarissa oli 0.124 g/km, kun vastaavasti SCR- ajoneuvojen keskiarvo oli 0.035 g/km. Tulosten perusteella ajoneuvo todettiin vialliseksi ja sen tilalle hankittiin toinen ajoneuvo MAN TGA 26.440. Uuden MAN:in kokonaishiukkaspäästö oli 0.050 g/km eli lähes 60 % alhaisempi. Hiukkaskokojakaumamittauksissa havaittiin, että näiden kahden eri ajoneuvon välillä ero kokonaislukumäärissä on noin kymmenkertainen. Kuvassa 10.19 on esitetty näiden kahden eri MAN- kuorma-auton hiukkaslukumääräjakauma Maantie- syklarissa. Tulos todistaa sen luonnollisen seikan, että jälkikäsitelylaitteiden hyvä kunto on äärimmäisen tärkeää toivotun matalan päästötason saavuttamisen kannalta.



Kuva 10.17. Hiukkaskokojakauma Scanialla ja Ivecolla eri sykleissä.



Kuva 10.18. Hiukkasten kokonaislukumäärä ja massapäästö eri ajoneuvoilla eri sykleissä.



Kuva 10.19. Kahden eri MAN- kuorma-auton hiukkasten kokonaislukumääräjakauma Maantie-syklissä.

10.4.3 Ammoniakkipäästö

Ammoniakkipäästöt mitattiin jatkuvatoimisesti eri ajosykleissä Gasmeter FTIR- laitteella. Ammoniakkipäästö mitattiin vain SCR-ajoneuvoilla. Keskimääräinen ammoniakkipitoisuus tutkituissa sykleissä ei ylittänyt millään ajoneuvolla havaitsemisrajaa (3 ppm).

10.5 YHTEENVETO

VTT:n tutkimuksissa on keskitytty sääntelemättömien päästöjen mittauksiin sekä uusilla että vanhoilla ajoneuvoilla, jotka edustavat laajasti erilaisia moottori- ja jälkikäsitteletekniikoita. Tutkimukset kattavat ensisijaisesti linja-autokaluston hiilivety- ja karbonyylipäästö- sekä hiukkasten koko- ja lukumääräjakaumamittaukset sekä hiukkasten koostumuksen tutkimuksen. Kuorma-autoilla ei-säänneltyjen päästöjen mittaukset painottuivat hiukkasten kokoon ja lukumäärään. Ajoneuvotekniikan erityispiirteet huomioiden on lisäksi mitattu mm. ammoniakkipäästön osuus testisyklin aikana. Selvitettäessä ajoneuvokaluston rakenteen merkitystä kaupunki-ilman kohonneisiin NO₂- pitoisuuksiin mukana olivat myös henkilöautot.

Tutkimuksissa havaittiin mm., että NO₂- lähipäästöihin vaikuttivat raskaista ja kevyistä ajoneuvoista eniten uudet tehokkaalla hapettavalla jälkikäsitteilyllä, osittaishiukkassuodattimella tai katalysoivalla suodattimella varustetut ajoneuvot. Ongelmallisiksi todettiin myös suorien NO₂- päästöjen osalta linja-autoissa yleistyneet SCR+DPF- yhdistelmät, jossa samanaikaisesti vähennetään sekä typen oksidi- että hiukkaspäästöjä. Edellä mainituilla tekniikoilla NO₂/NO_x- suhde ei ole ajoneuvon elinaikana välttämättä pysyvä, vaan laskee katalysaattorijärjestelmän ikääntyessä ja puhdistustehokkuuden laskiessa. Raskaiden ajoneuvojen osalta käytössä olevien puhdistustekniikoiden joukossa NO₂- ja NO_x- päästöjen vähennyksen kannalta parhaita tekniikoita olivat hyvin toimivat uudet SCR- järjestelmät sekä TWC -katalysaattorit stokiometrisissä maakaasubusseissa.

Dieselkäyttöisten, eri päästötasoja (Euro III ja Euro IV) edustavien linja-autojen pakokaasujen sisältämät hiilivetypitoisuudet ja hiukkaskokojakaumat olivat hyvin yhtenevät. Tarkasteltaessa karbonyyliyhdisteiden kokonaispitoisuutta, aldehydipitoisuuksia, hiukkaskokojakaumia ja hiukkasten sisältämiä PAH- yhdisteitä havaittiin niiden pienenevän systemaattisesti siirryttäessä Euro III- tasosta EEV –tasoon. Hiukkaskokojakaumat korreloivat standardin mukaisen hiukkasmassapäästön kanssa. Hiukkasten PAH -yhdisteiden koostumus muuttui ajoneuvotekniikkasidonnaisesti muita päästöjä radikaalimmin sekä määrällisesti että laadullisesti. Eri linja-autotekniikoiden osalta säänneltyjen päästöjen pienentyessä myös ei- säännellyt päästöt pienenevät. Maakaasukäyttöisten linja-autojen ei-säänneltyjä päästöjä hallitsevat metaani, formaldehydi ja ammoniakki. Laihaseostekniikalle ominaisesti metaanipäästö ja karbonyyliyhdisteiden kokonaispitoisuus oli moninkertainen verrattuna stoikiometriseen moottoriin.

Kuorma-autotekniikoiden osalta hiukkaskokojakauman muoto ja akkumulaatiomoodin paikka voi vaihdella riippuen ajosyklin kuormittavuudesta ja ajoneuvotekniikasta. Mitään yksiselitteisiä johtopäätöksiä eri ajoneuvotekniikoiden välillä ei voida tehdä.

Viitteet

Nils-Olof Nylund & Kimmo Erkkilä, Bussikaluston pakokaasupäästöjen evaluointi: Yhteenvetoraportti 2002-2004, Tutkimusraportti Nro PRO3/P3018/05. (2005)
<http://www.vtt.fi/inf/julkaisut/muut/2005/RAKEBUS.pdf>

Erkkilä, K, Lappi, M., Hartikka, T. ja Nylund N.-O., Bussikaluston pakokaasupäästöjen evaluointi: Vuosiraportti 2005, Tutkimusraportti Nro VTT-R-03435-07. (2007).

www.vtt.fi/inf/julkaisut/muut/2007/RakeBus2005.pdf

Environmental Protection Agency (EPA), Control of Emissions of Hazardous Air Pollutants from Motor Vehicles and Motor Vehicle Fuels (2000) <http://www.epa.gov/otaq/regs/toxics/r00023.pdf>

Nylund, N.-O., Erkkilä, K., Ikonen, M., Lappi, M. The IANGV Bus Emission Study, NGV 2004 - 9th International Conference and Exhibition on NGV. Buenos Aires, 26-28 Oct. 2004 (2004)

Työterveyslaitoksen OVA-ohjeet: <http://www.ttl.fi/internet/ova/formalde.html#ots2>

International Agency for Research on Cancer (IARC). (1989). Diesel and gasoline exhaust. <http://193.51.164.11/htdocs/monographs/vol46/46-01.htm>

NIOSH Chemical Listing and Documentation of Revised IDLH Values (as of 3/1/95), NTIS Publication No. PB-94-195047: Documentation for Immediately Dangerous to Life or Health Concentrations (IDLH) <http://www.cdc.gov/niosh/idlh/intridl4.html>

Sosiaali- ja terveysministeriö. Kemian työsuojeluneuvottelukunta. HTP-arvot 2007. Sosiaali- ja terveysministeriö, Tampere. (2007) <http://www.ketsu.net/http/HTP2007.pdf>

Indicative Occupational Exposure Limit Values (IOELVs), EU- direktiivit 2000/39/EC ja 2006/15/CE. http://ec.europa.eu/employment_social/health_safety/docs/ioelvs_en.pdf

11 YHTEENVETO

RASTU-projekti oli jatkoa vuosina 2003-2005 raskaiden ajoneuvojen energiatehokkuuden parantamiseen keskittyneelle HDenergia-projektille. Energiatehokkuusnäkökulman lisäksi RASTU:un otettiin teemoina mukaan myös ympäristöominaisuudet ja turvallisuus.

RASTU:n päätavoite oli edelleen energiankulutuksen pienentäminen ajoneuvoteknisin keinoin. Keinoja ja vaikutusmahdollisuuksia etsittiin mm. renkaista, autovalinnoista, voiteluaineista, aerodynamiikasta, kuljettajien kannustamisesta ja ajamisen automatisoidusta opastamisesta. Turvallisuuteen liittyvää tutkimusta tehtiin automaattisen liikkautentunnistuksen ja raskaiden ajoneuvojen rengasvalintojen stabiilisuusvaikutusten saralla.

Bussimittauksia tehtiin projektin aikana noin 60. Mitattujen autojen joukossa oli 10 EEV-tasoista dieselautoa, ja kaikki osoittautuivat varsin vähäpäästöisiksi. Ero parhaimpien dieselbussien ja stoikiometristen maakaasubussien välillä päästämielessä on kuitenkin edelleen olemassa, maakaasubussien hyväksi. EEV-tason maakaasubusseja oli mittauksissa 16 yksilöä. Parhaimmillaan normaalirakenteiset (ei kevytrakenteiset) bussit yltivät Braunschweig-syklissä CO₂-päästöön joka on noin 1100 g/km. Tämä pätee niin diesel- kuin maakaasubusseihin. Kolmiakselisilla busseilla CO₂-päästö oli tasolla 1400 g/km.

Seurantamittauksia tehtiin yhteensä viidelle autolle. Kahdessa autossa (Volvo Euro II ja Scania Euro III) oli jälkiasennettu pDPF hiukkaskatalysaattori. Uutena hiukkaskatalysaattori pudotti molemmissa autotyypeissä hiukkaspäästöä noin 45 %, eikä 120 000 km seurantajakson aikana ilmennyt päästötason kohoamista. Hapettavalla katalysaattorilla varustetussa autossa päästötaso kohosi pitkän seurantajakson aikana; katalysaattorin uusiminen olisi ollut tarpeen 200 000...300 000 kilometrin välillä. Euro IV-tasoisen EGR-Scanian CO- ja THC-päästöt kohosivat selvästi 380 000 km seurantajakson aikana, NO_x-päästö laski lievästi ja PM päästö kohosi lievästi. Stoikiometrinen maakaasuman auton päästöt kohosivat karkeasti 350 000 km ajon jälkeen mahdollisesti laitevian seurauksena.

Kuorma-autojen osalta uudet Euro IV- ja Euro V-tekniikoita edustavat ajoneuvot osoittautuivat polttoaineenkulutuksen osalta (ml. NO_x:n pelkistykseen kuluva urea) taloudellisemmiksi kuin Euro III-tason ajoneuvot keskimäärin. Selvintä tämä oli moottoritienopeuksissa. Myös ajoneuvojen päästöt olivat varsin alhaisia, joskin alhaisen keskimääräisen kuorman jakelusykleillä mitattiin myös korkeahkoja päästötasoja.

Yleisesti ottaen voidaan todeta että uusimmat puhtaimpien päästölukitusten mukaiset raskaat ajoneuvot ovat nyt myös käytännön ajotilanteissa aikaisempaa puhtaampia, vaikka parannettavaa edelleen löytyy etenkin hyvin nopeasti muuttuvia moottorien kuormitustilanteita sisältävissä kaupunkibussien ajotapahtumien päästöissä. Huomattavaa on myös se, että sekä kaupunkibussien että kuorma-autojen tapauksissa uusimmat moottorityyppit ovat myös aikaisempaa energiatehokkaimpia, vaikka päästörajoitukset

ovat kiristyneet merkittävästi projektin keston aikana. Tämä juontaa juurensa toisaalta SCR-järjestelmien käyttöönottoon, jotka ovat mahdollistaneen moottorin säätöjen optimoinnin kulutuksen perusteella. Toisaalta uudet päästömääräykset ovat edellyttäneet moottorien palotapahtuman kehittämistä joudutetusti, mikä on saattanut vauhdittaa myös energiatehokkuuden kehittymistä.

Polttoainetutkimusta tehtiin dieselpolttoaineen ja perinteisen biodieselin (RME) sekoituksilla pakettiautolla (Volkswagen) ja keskiraskaalla kuorma-autolla (MAN Euro III). Ajoja tehtiin myös 100 %:n RME:llä ja kuorma-auton osalta lisäksi 100 %:n NExBTL:llä. Tulokset vastasivat odotuksia. RME vähensi hiukkasia tehokkaasti, mutta lisäsi NO_x-päästöä. Pakettiautossa hiukaspäästö väheni 65 – 75 % ja NO_x-päästö lisääntyi 12 – 20 % 100 %:n RME:tä käytettäessä. Kuorma-autossa 100 %:n NExBTL:llä oli sama hiukkasia vähentävä vaikutus kuin 50 %:n RME-seoksella. NExBTL ei kuitenkaan lisännyt NO_x-päästöä, vaan päinvastoin se vähensi NO_x-päästöä noin 10 % tavalliseen dieselpolttoaineeseen verrattuna.

Voiteluainekokeita tehtiin bussilla alustadynamometrissa sekä bussin moottorilla moottoridynamometrissa. Ajoneuvokokeissa kahden 10W40-luokan öljyn ero polttoaineen kulutuksessa oli suurimmillaan 1,8 %. Automaattivaihteiston öljyn vaihdolla voitiin säästää jopa 3 % polttoainetta. Moottorikokeissa sekä uusilla että vanhennetuilla öljyillä öljyjen väliset erot olivat suurimmillaan runsaan prosentin luokkaa tiettyjen vakiokuormapisteiden keskiarvona. Pienillä kuormilla mitattiin suurimmat erot.

Ajoneuvotekniikan kehitystyöhön kohdistuvia osatehtävistä moni toteutettiin diplomityönä. Kehityskohteita haettiin aerodynamiikasta, renkaista, raskaiden ajoneuvojen massan pienentämisestä kevytrakennetekniikalla, akseliston suuntaamisesta, moduuliyhdistelmän stabiliteetista sekä 42/60 tonnisten yhdistelmien energiatehokkuusvertailulla

Yleisin tapa pudottaa painoa perävaunuissa on vaihtaa materiaali perinteisestä teräksestä ja raudasta alumiiniin, suurlujuusteräkseen, erilaisiin metalliseoksiin tai komposiitteihin. TKK:n simulointien mukaan 1000 kg pudotus kokonaismassassa merkitsee runsaan prosentin polttoaineenkulutuksen alenemista.

Stabiilisuuden kannalta täysperävaunun 2. ja 5. akseleilla olisi koko ajan pidettävä mahdollisimman hyviä renkaita. Yleisesti renkaat on hyvä poistaa käytöstä viimeistään, kun urasyvyys on 3 mm. Suositeltava turvallisuusminimi on talvella 5 mm, ja perävaunun 2. ja 5. akseleilla olisi aina pidettävä tätä paremmat renkaat.

Kuorma-auton perävaunun, vetoakselin ja etuakselin renkaiden oikeilla valinnoilla voidaan säästää polttoaineen kulutuksessa jopa yli 10 %. Turvallisuustekijöitä ei kuitenkaan tule unohtaa. Vaikka rengas olisikin polttoaineen kulutuksen kannalta hyvä, ei se välttämättä ole pito-ominaisuuksiltaan optimaalinen. Linja-autoilla kulutusero mitattujen poikittaiskuvioitujen renkaiden välillä kaupunkisyklissä oli suurimmillaan 2.5 %. Pitkittäiskuvioitujen renkaiden välillä ero oli 2.6 %. Kuorma-autolla tehdyissä mittauksissa kulutusero renkaiden välillä oli suurimmillaan 3.7 %.

Kahden tyypillistä tekniikkaa edustavan ajoneuvon vertailumittauksissa 42 tonnin yhdistelmä osoittautui 60 t yhdistelmää energiatehokkaammaksi täyteen 42 tonnin kuor-

maan asti. Täyteen kuormatulla 60 t yhdistelmällä saavutetaan parempi energiatehokkuus kuin 42 tonnin yhdistelmällä parhaimmillaan.

Kuorma-auton ilmanvastusta voidaan ennen kaikkea pienentää modifioimalla keulan ja takapään muotoja. Vähentämällä keskimääräistä keulan etuosan painetta ja kasvattamalla keskimääräistä peräpainetta vastus vähenee. Vastusminimiä haettaessa on kuitenkin otettava huomioon käytettävyyden kannalta tärkeät seikat, kuten kuormatilojen pintojen suoruus, laatu ja puhtaus.

Kuorma-autoihin verrattuna linja-auton suunnittelussa on huomattavasti vapaammat kädet. Lisäksi kuorma-autoon verrattuna linja-autoilla on aerodynaamisesti edullisemmat muodot, sillä auto on periaatteessa vain yksi suorakulmainen särmiö. Myös linja-autoissa aerodynamiikkaa parantaa ulkopintojen epätasaisuuksien minimointi. Nykyaikaiset pikavuoroautot ovatkin jo usein varsin hyvin huoliteltuja pienten yksityiskohtien osalta.

Akseliston suuntaamisella havaittiin olevan hyvin pieni merkitys raskaan kaluston energiankäyttöön tyypillisesti ajoneuvoissa esiintyvillä suuntausvirheillä. Johtopäätös perustuu suuntausvirheiden dokumentointiin ja edelleen kulutusmittauksiin erilaisilla suuntausvirheillä.

Projektissa kehitettiin seuraavia ajoneuvon IT –sovelluksia: kuljettajan ajo-opastin, automaattinen liukkauden tunnistus sekä kuorman tunnistus. Ajo-opastimessa keskityttiin kaupunkibussin opastamiseen. Kaupunkibusseille on tyypillistä kiinteät ja toistuvat reitit ja suuret nopeusvaihtelut. Myös palvelutason ja etenkin aikataulussa pysymisen merkitys on henkilöliikenteessä suuri. Ajo-opastimen tehtävänä kaupunkibussiliikenteessä on

- opastaa kuljettajaa ajamaan polttoainetaloudellisesti sekä
- huolehtia aikataulussa pysymisestä.

Prototyyppeasteelle kehitetty opastin otettiin käyttöön yhteensä 15 linja-autossa pääkaupunkiseudulla ja Jyväskylässä. Kokemukset opastimen toiminnasta ovat myönteisiä mutta vasta alustavia pienestä määrästä ja lyhyestä toiminta-ajasta johtuen.

Kehitetyn liukkausalgoritmin peruseriaate on tarkkailla vetävien pyörien ja etupyörien välistä nopeuseroa suhteessa moottorin tuottamaan työntövoimaan. Näin saadaan liukkausindeksi, joka on käänteinen kitkakertoimelle. Kokemusten mukaan järjestelmä pystyy tunnistamaan liukkauden ennen kuin kuljettaja huomaa sitä, mutta toiminta ei ole vielä riittävän yksiselitteistä. Keskeisinä ratkaisemattomina ongelmina kehitetyn menetelmän toiminnassa ovat autojen erilaisuuden (rakenne, renkaat, kuormat) ja tiestön erilaisuuden huomioiminen.

Ajoneuvoyhdistelmän massan estimointimenetelmä perustuu ajoneuvon dynaamisen tilan muutosten syy- ja seuraussuhteiden havainnointiin energiaperiaatteen avulla.

Linja-autojen liikennöinnin optimointia varten kerättiin dataa busseihin asennettujen ajo-opastinlaitteiden avulla. Liikenteen optimoinnin tavoitteena oli liikennöinnin taloudellisuuden ja tehokkuuden lisääminen, liikennöinnin laadun parantaminen ja liikenteen nopeuttaminen. Projektissa kehitettyjä työkaluja on käytetty mm. liikennevalojen vihreiden vaiheiden ajoittumisen optimointiin. Bussin ajo-opastin voisi sovittaa nopeuden siten, että turhat kiihdytykset ja turhat liikkeellelähdöt vältetään, jolloin osutaan paremmin liikennevalo-ohjauksen vihreisiin vaiheisiin.

Kuljettajien taloudellisen ajotavan kannustinjärjestelmällä voidaan parantaa ja pitkittää taloudellisen ajotavan koulutusten vaikutuksia, mikä tuo säästöjä kuljetusyritykselle. Tampereen kaupungin liikennelaitokselle (TKL) kehitetty järjestelmä on osoittautunut periaatteiltaan toimivaksi kaupunkibussiliikenteen käyttöön. Kuljettajien vastaanotto on ollut positiivista ja kiinnostunutta. Järjestelmässä raportoidaan myös autokohtaisia kuluksia, mikä on jo auttanut tunnistamaan rikkiäisen tai väärin säädetyn bussin. Linjakohtaisen kulutustiedon saaminen puolestaan auttaa liikennöitsijää hinnoittelemaan linjat paremmin kustannustasoa vastaavasti.

Energiansäästötoimenpiteiden tehokkuuden arviointi osatehtävässä kehitettiin energiansäästötoimenpiteiden tehokkuuden arviointilaskelmia. Toimenpiteiksi voidaan lukea esimerkiksi uudempiin euroluokkiin siirtyminen, energiaa säästävien renkaiden käyttöönotto, energiaa säästävien öljyjen käyttöönotto ym. Energiapalveludirektiivi edellyttää sellaista energian säästön laskentaa, joka ei riipu kulutetun, todellisen energian määrästä. Perusajatuksena on, että laskelmilla voidaan osoittaa, miten paljon enemmän energiaa nyt kuluisi, ellei toimenpiteitä olisi tehty. Tällöin todellinen energiankulutus on voinut nousta tai laskea. Laskentaan tehtiin Excel-malli, johon voidaan syöttää kalustomääriä ja niiden ominaisuuksia eri tarkasteluajankohtina. Kalustossa tapahtuneiden muutosten vaikutuksia energiankulutukseen lasketaan kertoimien avulla, jotka kuvaavat eri toimenpiteiden keskinäisiä eroja kulutuksessa. Kun kaikki toimenpiteet on kuvattu malliin, saadaan muutoksen kokonaisvaikutus tarkasteluajankohtien välillä.

Taajamien ilman NO₂-tasojen kohoaminen ajoittain liian korkeaksi on ongelma, jonka syitä RASTU pakokaasutkimuksessa selvitettiin. NO₂-muodostus on vahvasti sekä pakokaasun lämpötilan että erityisesti dieselauton jälkikäsitteilylaitteen lämpötilan funktio. Tämän tutkimuksen mukaan tällöin noin 90 % NO_x:sta ja yli 80 % NO₂:sta voi olla raskaista kaupunkiajoneuvoista peräisin. Korkein mitattu NO₂-osuus, noin 60 %, mitattiin EEV-tasoiselle SCR-katalysaattorilla ja CRT-hiukkassuodattimella varustetulle bussille. Pelkällä SCR-katalysaattorilla suora NO₂-päästö on alhainen, samaten maakaasubusseilla.

Pakokaasumittauksilla selvitettiin myös uusien vähäpäästöisten ajoneuvojen ns. ei säänneltyjä päästöjä kuten aldehydejä, ammoniakkaa, kaasumaisia yksittäisiä hiilivejä, hiukkasten PAH yhdisteitä ja mutageenisuutta. Lisäksi mitattiin sekä hiukkasten lukumäärää että kokojakaamaa. Yleisesti EEV-tason dieselajoneuvot olivat Euro III ja Euro IV-ajoneuvoja ”puhtaampia” edellä mainittujen päästöjen suhteen. Maakaasuautojen hiukkaspäästöt olivat luonnollisesti erittäin alhaiset. Myös pakokaasujen korkea metaanipitoisuus oli ennestään tunnettu tosiasia toisin kuin korkea ammoniakkipitoisuus. Tämän arvellaan johtuvan katalysaattorissa tapahtuvassa osittaisesta hapettumisesta.

Huhtikuussa 2009 annetussa direktiivissä (2009/33/EY) tavoitellaan ympäristöystävällisten ja energiatehokkaiden ajoneuvojen edistämistä. Direktiiviehdotuksen tavoitteena on sisällyttää julkisen sektorin ajoneuvojen ja palveluiden hankintaan pakollinen vertailuperuste, joka ottaa huomioon ajoneuvon käytönaikaisen energiankulutuksen, hiilidioksidipäästöjen sekä saastepäästöjen kustannukset. Direktiiviehdotus sisältää ”tilauksen” RASTU-hankkeen puitteissa toteutetulle raskaiden ajoneuvojen mittaustoinnalle.

RASTU on lisännyt tietämystä energiankulutukseen vaikuttavista tekijöistä, ja tätä tietoa voidaan käyttää niin autojen käyttäjien toiminnassa, autojen suunnittelussa kuin yhteiskunnallisissa päätöksissäkin. Lisäksi IT-järjestelmien hyödyntämisestä projektissa kehitetyissä ajoneuvosovelluksissa saadut opit mahdollistavat edelleen uusien IT-sovellusten kehittämisen ja hyödyntämisen.

LIITE 1.

RASTU:N RAHOITTAJATAHOT

Tekes

Liikenne- ja viestintäministeriö

Ympäristöministeriö (2006)

Ajoneuvohallintokeskus AKE

Tiehallinto

HKL Suunnitteluyksikkö

Pääkaupunkiseudun yhteistyövaltuuskunta YTV

ADEME, Ranska

Vägverket, Ruotsi

Concordia Bus Finland Oy (2006)

Kabus Oy

Linja-autoliikenteen Volvo-säätiö

Neste Oil Oyj

Nokian Renkaat Oyj

Oy Närko Ab

Oy Pohjolan Henkilöliikenne Ab,

Proventia Emission Control Oy

Suomen Posti Oyj

Tampereen kaupungin liikennelaitos

Transpoint Oy Ab

VTT