

Rapport



Kunskapssammanställning - EURO VI stadsbussar

Avgasemissioner

Buller

Miljöpåverkan

Kostnader

En rapport för Trafikverket

2015-05-11

Rapport nr 157078

Ecotraffic

Innehållsförteckning

Sammanfattning.....	vii
English summary	xvi
Bibliografi	xxv
Förkortningar och nomenklatur	xxvii
1 Introduktion.....	1
1.1 Bakgrund: bussar i ett lite större sammanhang	1
1.2 Metodik	2
1.3 Studie av Blekinge Tekniska Högskola	3
1.3.1 Några exempel på resultat från BTH-studien	3
1.3.2 Analys av bakgrundsdata till BTH-studien	5
2 uppdraget	8
3 Stadsbusstrafik i Sverige	9
3.1 Antal stadsbussar i Sverige	10
3.2 Bussar uppdelat på ålder och Euroklass.....	10
3.3 Bussar uppdelat på bränsle	11
3.4 Bussar uppdelat på Euroklass.....	11
3.5 Bussar uppdelat efter fordonsstorlek	12
3.6 Bussar uppdelat efter vikt	12
3.7 Bussar uppdelat på antalet passagerare	13
3.8 Bussar uppdelat på fabrikat	14
3.9 Bilar, bussar, lastbilar och invånare.....	14
3.10 Körsträckor, passagerarkilometer	15
4 Teknikbeskrivning.....	16
4.1 Teknikneutralitet	16
4.2 Energiomvandlare	17
4.2.1 Ottomotorn	18
4.2.2 Dieselmotorn	18
4.2.3 Elmotorn	19
4.3 Energilager.....	20
4.3.1 Batterier.....	21
4.3.2 Superkondensatorer.....	21
4.3.3 Svänghjulslager.....	21

4.3.4	Tryckluftslager	22
4.4	Kombinationer av drivmedel, energiomvandlare och drivsystem	22
4.4.1	Konventionella dieselbussar	22
4.4.2	Biodieselbussar	25
4.4.3	Biogasbussar	26
4.4.4	Etanolbussar	30
4.4.5	Elhybridbussar	31
4.4.6	Eldrivna bussar	33
4.4.7	Alternativa hybridsystem	35
5	Bränslen för bussar	38
5.1	Diesel	38
5.2	HVO	38
5.3	ED95	39
5.4	Biogas – och fordonsgas	39
5.5	Biodiesel (FAME)	40
5.6	El – nordisk elmix	41
6	emissioner och förbrukning – bussar	43
6.1	Underlag	43
6.1.1	Testcykler	43
6.1.2	Relevant litteratur	44
6.1.3	Bränsleförbrukning, energianvändning och CO ₂	51
6.1.4	Emissioner	56
7	Livscykelanalys (LCA)	63
8	Buller	67
8.1	Direktiv (70/157/EEG) av den 6 februari 1970	67
8.2	Gränsvärden	67
8.3	Miljökostnader - buller	70
8.3.1	Förutsättningar	72
8.3.2	Samhällsekonomisk värdering av buller	73
8.3.3	Bostäder	73
8.3.4	Förskolor/barnstugor, vårdinstitutioner och hotellrum	74
8.3.5	Skolor	74
8.3.6	Kontor och andra relativt bullerkänsliga lokaler	74

8.3.7	Parker	74
8.3.8	Oskyddade trafikanter och andra i gaturummet.....	74
8.3.9	Sammanfattning av antagna kostnadsfunktioner aktuella i städer	75
8.3.10	Bullerberäkningsmetod	75
8.3.11	Beräkningsmodell.....	76
8.3.12	Implementerad modell och använt program	76
8.3.13	Stadsbussarnas bulleregenskaper	77
8.3.14	Typfall	77
8.3.15	Sammanställning, kostnader för bussar under olika förhållanden	80
8.3.16	Analys och användning av typfallen	80
9	Ekonomi.....	82
9.1	Bränslepriser.....	82
9.2	Sammanfattande tabeller ekonomi	83
9.3	LCC-kostnader (Life cycle cost).....	85
9.4	Kostnader för föraren.....	86
9.5	Exempelberäkning – hybridbussar	86
9.6	Kostnader som buller från bussar åsamkar omgivningen, exempel	88
9.6.1	Storstadsmiljöer liknande Stockholm, innerstaden	88
9.6.2	Städer liknande Uppsala.....	88
9.6.3	Städer liknande Kristianstad.....	89
9.6.4	Betydelsen av tystare bussar.....	89
9.7	Summering av kostnader för bussägaren, samt kostnader för miljö och buller	90
10	Intervjuer – enkätundersökning.....	94
10.1	Frågor som ställts	94
10.2	Svar från busstillverkare [TV]	96
10.2.1	Svar från Volvo bussar [Edward Jobson och Jonas Pettersson]	97
10.2.2	Svar från Scania [Jonas Strömberg].....	98
10.2.3	Svar från MAN [Alexander Sylwan]	99
10.2.4	Svar från Mercedes [Lars-Olof Gummesson]	100
10.3	Svar från operatörer [OP].....	101
10.3.1	Svar från Keolis [Jan Forsell].....	101
10.4	Svar från huvudmän [HM]	102
10.4.1	Svar från Västtrafik [Hanna Björk och Andreas Sorthaga]	102

10.4.2	Svar från Din Tur [Stefan Valjeesio].....	103
10.4.3	Svar från Östgötatrafiken [Eva Skagerström]	104
10.4.4	Svar från Stockholms Lokaltrafik [Maria Övergaard]	104
10.5	Svar från branschorganisationer [BO]	105
10.5.1	Svar från Svensk Kollektivtrafik [Leif Magnusson]	105
10.5.2	Svar från Sveriges Bussföretag [Lars Annerberg]	106
11	Framtiden – efter Euro VI.....	107
11.1	Konventionella dieselbussar.....	107
11.2	Biogasbussar.....	109
11.3	Etanolbussar	109
11.4	Elhybridbussar	109
11.5	Eldrivna bussar	111
11.5.1	Elpris	111
11.5.2	Övriga förutsättningar	112
11.5.3	Kostnader för elbussar	114
12	Diskussion.....	116
13	Författarnas tack	119
14	Referenser	120

Figurer

Figur 1.	Energianvändning per km (från BTH-rapporten)	3
Figur 2.	Avgasemissioner per energibärare (från BTH).....	4
Figur 3.	Sveriges bussflotta (antal) uppdelat på drivmedel. Källa Trafikanalys [].	11
Figur 4.	Sveriges bussflotta uppdelat på antal passagerare (max antal, d.v.s. både sittande och stående) [14].	13
Figur 5.	Antal fordon i trafik över tid	15
Figur 6.	Verkningsgrad för elmotor med permanentmagnet (källa: Magna electronics).....	19
Figur 7.	Kostnad för bränsle och urea med SCR och med och utan EGR (från [21], bearbetat av Ecottraffic).....	23
Figur 8.	Potential för Euro V och VI.....	24
Figur 9.	Olika koncept för användning av metan i tunga fordon (från Ahlvik [23]).....	27
Figur 10.	NO _x och metanemissioner med olika tekniker för gasmotorer (källa: FEV/RWTH)	28
Figur 11.	Jämförelse mellan buller från en gasdriven och dieseldriven version av Mercedes 936 motorn (källa: Mercedes)	30
Figur 12.	Potential för bränsleförbrukning och effektivitet/energiflöde för serie- och parallellhybrider (källa: MAN)	32
Figur 13.	Kinetisk hybrid (Wrightbus)	35
Figur 14.	Altair hydraulisk hybridbuss (serietyp)	36
Figur 15.	Fossil CO ₂ i WTW perspektiv. Data bygger på LCA-data från Statens Energimyndighet, se detaljer ovan. Att stapeln för biogas är förhållandevis hög beror bl.a. på att verkningsgraden för biogasmotorn är lägre än för övriga alternativ (startar på 125 %). För hybridbussar har en bränslebesparing på 25 % använts.	65
Figur 16.	Samhällsekonomiska kostnader av trafikbuller utomhus.....	75
Figur 17.	Samhällsekonomiska kostnader av trafikbuller inomhus	75
Figur 18.	Utveckling av bränslepriser under 2014 (kr/l eller kr/kg för gas).....	82
Figur 19.	Nuvärdesjusterade LCC-kostnader (SEK) för olika stadsbussar. Bränslepriser inklusive skatter men exklusive moms.	85
Figur 20.	Brytpunkter när det lönar sig att använda en hybridbuss i stället för en dito konventionell buss driven med diesel eller FAME.....	87

Tabeller

Tabell 1.	Fördelning av persontransportarbetet i Sverige 2014.....	9
Tabell 2.	Bussar uppdelat på Euro-klass.....	11
Tabell 3.	Bussars storlekar	12
Tabell 4.	Bussars vikt	12
Tabell 5.	Bussfabrikat	14
Tabell 6.	Förändringar av fordon och befolkning mellan 2006 och 2013	14
Tabell 7.	Summering av resultat i DOE:s forskningsprogram	23
Tabell 8.	Data för några av bussarna som testats hos VTT.....	46
Tabell 9.	Data för några av bussarna som testats hos EC.....	47

Tabell 10.	Specifikationer för bussar i MJB-studien	48
Tabell 11.	Reduktion av icke-reglerade emissioner mellan 2004 och 2007 (%).....	49
Tabell 12.	Reduktion av icke-reglerade emissioner mellan 2004, 2007 och 2010 (%).....	50
Tabell 13.	Jämförelse av relativ och viktad bränsleförbrukning för olika kombinationer av drivmedel och drivsystem (hybrid eller konventionell)	52
Tabell 14.	Valda data för olika kombinationer av drivmedel och drivsystem	54
Tabell 15.	Emissionsvärden i transienta körcykler i EU	57
Tabell 16.	Certifieringsdata för bussar	57
Tabell 17.	Emissionsfaktorer för bussar	62
Tabell 18.	Utsläppsminskningar jämfört med diesel för olika biobränslen WTT. I denna rapports beräkningar används de nyckeltal som anges av Statens Energimyndighet, den vänstra kolumnen. [WTT-data är beräknade till producentens ”grind”. Detta gör att distributionen inte är medräknad. Vår bedömning är att detta steg i sammanhanget är försumbart och vi har därför inte tagit hänsyn till det.]	63
Tabell 19.	Nordisk elmix 2013	64
Tabell 20.	Bullerkostnader i olika miljöer	71
Tabell 21.	Summering av bullerkostnader i tre svenska städer	72
Tabell 22.	Sammanställning, kostnader för bussar under olika förhållanden.....	80
Tabell 23.	Bränslepriser(ex moms) som ligger till grund för beräkningar	83
Tabell 24.	Kostnader relativt konventionell dieselbuss.....	84
Tabell 25.	Förklaring till vilka kostnader som använts till beräkning av LCC-kostnader för en konventionell 2-axlig, 12-meters dieselbuss i låggolvsutförande.....	85
Tabell 26.	Beräkning av förarens kostnader under bussen total användningstid. Antagandena är grova och mest påverkas beräkningen av val av medelhastighet. Vi har valt 30 km per timme för typisk stadsbusstrafik. I förarens ställtid räknas betald tid för att hämta och ställa tillbaka bussen, möten, utbildning, d.v.s. allt betald tid som åtgår till annat än att köra buss. I beräkningarna ovan så ser man att förarens kostnader är det som dominerar för stadsbusstrafik.	86
Tabell 27.	Sammanställning, bullerkostnader för bussar i olika städer, exempel.....	89
Tabell 28.	Summering av kostnader för bussägaren	90
Tabell 29.	Summering av miljökostnader	91
Tabell 30.	Utsläpp av fossil CO ₂ för olika buss/bränslekombinationer under dess användning. Som beräkningsunderlag har för en konventionell 2-axlig, 12-meter dieselbuss följande siffror använts. 10 år, 6 000 mil per år, 4,18 liter per mil samt 2,89 kg CO ₂ per liter diesel. Läs mer om beräkningarna tidigare i kapitel 9.	92

SAMMANFATTNING

Ecotrafic har av Trafikverket fått i uppdrag att ta fram ett kunskapsdokument om stadsbussar i Sverige. Detta kunskapsdokument ska fungera som en underlagsrapport till ett kortfattat PM vilket i sin tur ska kunna användas som ett hjälpmedel och stöd vid upphandling av stadsbussar. Fokus för arbetet har varit på 2-axliga stadsbussar av Euro VI-klass¹.

Författarna av studien har ställts inför ett antal svårigheter. Det har varit svårt att få in data om priser, drivmedelsförbrukning, emissioner buller och annan relevant information från branschens aktörer. Det har lett till att en hel del beräkningar och ingenjörsmässiga uppskattning varit nödvändiga för att kunna genomföra arbetet.

Cirka 6 % av persontransportarbetet sker i Sverige med buss. Transportarbetet i Sverige domineras stort av personbilstransporter och dessa transporter står för drygt 76 % av landets persontransporter. Drygt 50 % av resorna inom kollektivtrafiken sker med buss. I Sverige finns cirka 7 000 – 8 000 stadsbussar i användning. Sveriges yngsta fordon är bussar och medianåldern för en buss är cirka 4 år. Som jämförelse så är medianåldern på en personbil 9 år och en lastbil 7 år. Antal personbilar, lastbilar och invånare ökar med tiden medan antal bussar är relativt konstant över tid. En typisk körsträcka för en 2-axlig stadsbuss är ca 6 000 mil per år och medelförbrukningen är ca 4,2 liter diesel per mil.

Vid en jämförelse mellan olika typer av drivmedel och drivsystem (inkl. hybrider) är teknikneutraliteten viktig. Det innebär i klartext att man inte ska jämföra äpplen och päron, t.ex. att en buss har katalysator och en annan inte har det.

Alla fordon använder en energiomvandlare av något slag. Energiomvandlare i det här fallet är otto- och dieselmotorer samt elmotorer. Energiomvandlarna kan kombineras med en konventionell transmission eller ett hybridsystem.

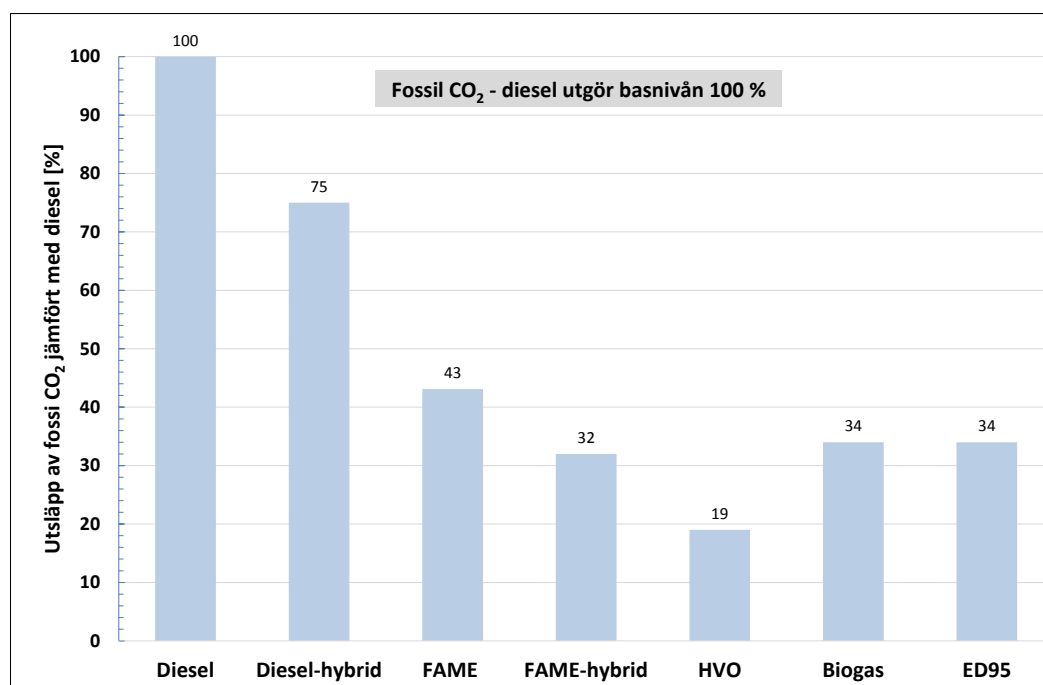
Skillnaden mellan Euro V och VI vad gäller bränsleförbrukning är liten och bränsleförbrukningen kan faktiskt minskas en del i framtiden för Euro VI med fortsatt teknisk utveckling. För biogas kan Euro VI bara klaras med trevägskatalysator och stökiometrisk förbränning. Det leder till en ökad förbrukning i förhållande till äldre gasmotorer med mager förbränning. Det finns potential till minskad förbrukning även med gasmotorer men en hel del av detta har redan implementerats. Någon etanolmotor för Euro VI finns inte kommersiell för tillfället. För att klara Euro VI med etanol behövs sannolikt ett specialutvecklat partikelfilter. Det borde vara tekniskt möjligt att åstadkomma detta. Den främsta fördelen med hybridbussar är den lägre bränsleförbrukningen i förhållande till konventionella dieslbussar. När det gäller avgasemissioner finns inte lika uppenbara fördelar. En del parametrar talar för lägre emissioner andra för högre. I framtiden finns kanske synergieffekter som kan ge en viss minskning av emissionerna men i dag finns inget underlag för att hävda detta.

¹ I denna rapport används genomgående beteckningar med romerska siffror för avgaskrav på motorer till tunga fordon och arabiska siffror för avgaskrav till lätta fordon.

De bränslen som används för att driva fram de svenska bussarna är i dagsläget

- HVO (hydrerad ickefossil olja)
- Diesel
- ED95 (etanol)
- Metangas i form av naturgas och biogas
- FAME (biodiesel)
- El

I detta arbete har vi använt livscykeldata i form av nyckeltal från Statens Energimyndighet. Dessa värden ska ses som ett sorts medelvärde av de biobränslen som används i Sverige. (Verkliga LCA-värden kan alltså både vara bättre och sämre än de data som används i denna studie.) Jämförelsen görs med diesel som utgör 100 % (figur S.1). Utsläppsminskningen presenteras som WTW (Well to Wheel).



Figur S.1. Fossil CO₂ i WTW perspektiv

Ur ett WTW-perspektiv så når man med de förutsättningar och antaganden som gjorts i detta arbete störst klimatnytta med bränslet HVO.

Den relativa bränsleförbrukningen (i dieselevivalenter) för de olika bussarna har beräknats utifrån testdata på bussar och framgår av Tabell S.1.

Bränsleförbrukningen enligt statistik från landets störste bussoperatör tillsammans med motorns medelverkningsgrad ger hur många kWh som motorn avger per

Tabell S.1. Relativ bränsleförbrukning

Drivmedel/ drivsystem	Relativ bränsleförbr.
Diesel	100 %
Fordonsgas	125 %
Etanol, ED95	100 %
Dieselhybrid	75 %

körd kilometer. Certifieringsdata har använts som bas för emissioner men i några fall har författarna varit tvungna att anta värden med stöd från litteraturen.

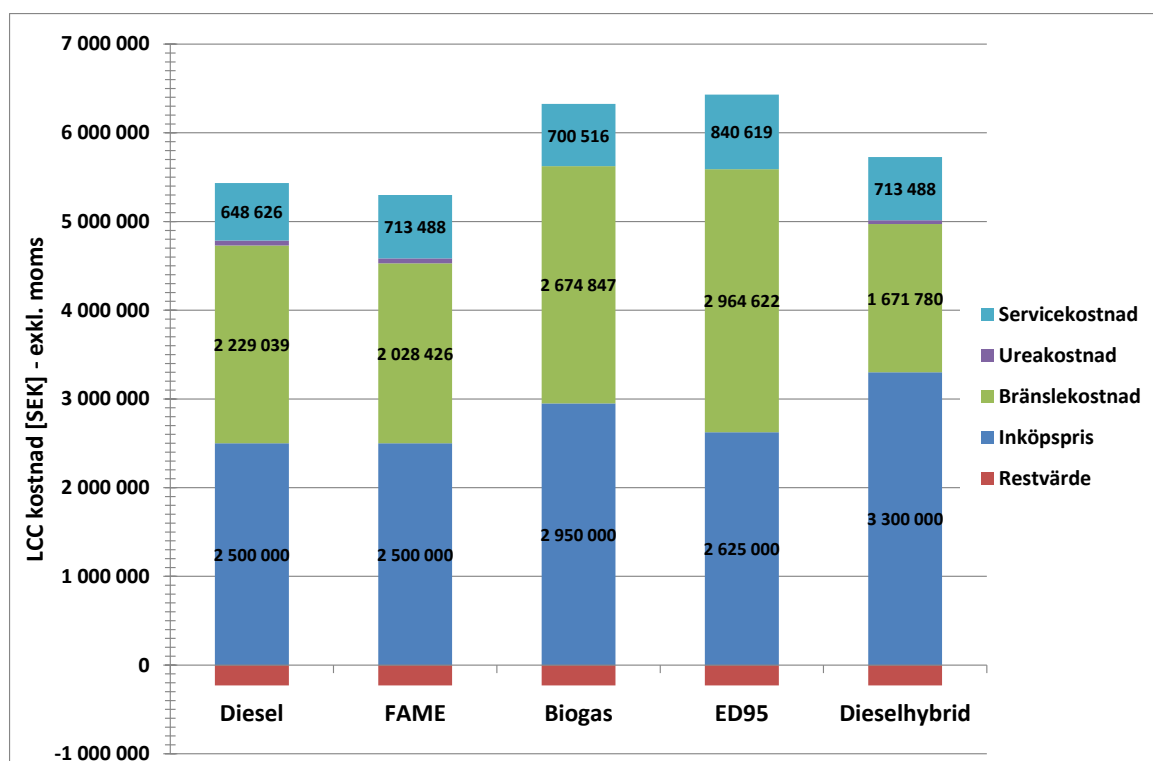
Emissionsfaktorer för de olika bussarna har räknats ut med certifieringsdata för emissioner (g/kWh) och hur mycket arbete som motorn producerar (kWh/km) som bas. Resultaten anges per körd kilometer och framgår av Tabell S.2.

Tabell S.2. Emissionsfaktorer för bussar

Bränsle/ hybrid	CO mg/km	NMHC mg/km	CH₄ mg/km	NO_x mg/km	PM mg/km	PN #/km
Diesel	118	37	0	472	4,1	2,9E+10
Hybrid	30	0	0	594	3,7	2,9E+10
Gas	612	192	339	472	(13,3)	i.d.
Etanol	(295)	(74)	(0)	(472)	(5,9)	(7,4E+10)

Ifall man bortser från CO och HC/NMHC, är emissionsnivåerna faktiskt rätt lika för alla alternativen i Tabell S.2. Skillnaderna mellan dieselbuss och dieselhybridbuss ska inte tolkas som "faktiska" skillnader p.g.a. teknik utan som spridning mellan motorindivider. I dag certifieras enbart motorn, vilket för hybridsystem inte är helt relevant. Biogas sticker av naturliga skäl ut med högre utsläpp av metan (CH₄) än de övriga alternativen, samt har högre partikel-emissioner (PM). I det sistnämnda fallet har nivån uppskattats utifrån chassidynamometer-tester på två olika bussar, vilket är ett testförfarande som skiljer sig från certifieringstester på motorer, som är underlag för andra motorer. Därför står värdet för PM för gas inom parentes. Antal partiklar (PN) regleras inte för gasdrivna motorer och eftersom få data på moderna gasmotorer finns, har författarna valt att inte uppskatta PN nivån. Några data för en etanoldriven bussmotor som certifieras för Euro VI finns inte, så här har alla data uppskattats. Partikelfilter behövs för att etanolmotorn ska klara partikelkraven i Euro VI.

Vi har i denna studie använt medelbränslepriser som var gällande under 2014. På senare tid har priserna fallit så de priser vi använt kan eventuellt bedömmas som för höga. Vart priserna tar vägen kan ingen förutspå så av den anledningen har vi valt att behålla tidigare antagna priser. LCC kostnader visas i Figur S.2.



Figur S.2. Nuvärdesjusterade LCC-kostnader (SEK – ex moms) för olika stadsbussar. Bränslekostnader inkluderar skatter men inte moms.

LCC-kostnaderna är beräknade för 2-axliga, 12-meters bussar i låggolvsutförande och med antagandet att bussarna körs 6 000 mil per år under 10 år. Som jämförelse kan nämnas att den största kostnaden för bussdriften är förarens kostnader. En konventionell dieselbuss kostar ca 86 kr per mil (LCC) samtidigt som kostnaderna för föraren är ca 150 kr per mil.

Man kan anta att en del av skatten på drivmedel inkluderar även samhällsekonomiska kostnader för t.ex. avgasemissioner och buller. Det har dock legat utanför ramarna för studien att uppskatta hur stor del av skatten detta utgör. Författarna har därför valt att *inte* summera bussägarens kostnader och kostnader för avgasemissioner och buller. I Tabell S.3 summeras olika kostnader för bussägaren.

Tabell S.3. Summering av kostnader för bussägaren

Kostnadsslag	Enh.	Diesel	FAME	Biogas	ED95	Hybrid	Elbuss
Inköpspris	öre/km	417	417	492	438	550	X
Restvärde	öre/km	-38	-38	-38	-38	-38	X
Bränslekostnad	öre/km	372	338	446	494	279	X
Ureakostnad	öre/km	9	9	0	0	4	X
Servicekostnad	öre/km	108	119	117	140	119	X
Summa	öre/km	867	845	1 016	1 033	913	X

Totalt sett så domineras kostnaden för bussägaren av inköp och drivmedel. Servicekostnaden är också en stor post. Därför inses lätt att ifall något av fordonen drabbas av högre servicekostnader än andra fordon, så kan det ge betydande kostnadsökningar.

I Tabell S.4 summeras miljökostnader för bussarna med bl.a. ASEK värden för avgasemissioner och buller. Tre orter har valts för jämförelserna. Kristianstad är referensort för ASEK och dessutom har Stockholms innerstad och Uppsala valts. Tyvärr finns ingen uppdelning på buller separat för de olika bussarna med konventionell förbränningsmotor, då det inte gick att göra sådana beräkningar. För hybridbussarna har antagits att de 75 % av tiden körs som en buss med normal förbränningsmotor och 25 % av tiden på enbart elmotor. När förbränningsmotorn körs i en hybridbuss antas bulleret (som medel) ligga på samma nivå som för en konventionell buss.

Tabell S.4. Summering av miljökostnader

Kostnadsslag	Enh.	Diesel	FAME	Biogas	ED95	Hybrid	Elbuss
ASEK – Kristianstad							
Partiklar	öre/km	1,1	1,1	3,5	1,5	1,0	
VOC	öre/km	0,2	0,2	1,1	0,4	0,0	
NO _x	öre/km	4,2	4,2	4,2	4,2	5,3	
Buller	öre/km	360	360	360	360	294	97
Summa - Kristianstad	öre/km	365	365	369	366	301	97
ASEK - St:holm, innerst.							
Partiklar	öre/km	5,0	5,0	16,2	7,2	4,5	
VOC	öre/km	0,3	0,3	1,4	0,5	0,0	
NO _x	öre/km	1,8	1,8	0,0	1,8	2,3	
Buller	öre/km	415	415	415	415	333	87
Summa – St:holm, innerst.	öre/km	422	422	433	425	340	87
ASEK – Uppsala							
Partiklar	öre/km	2,3	2,3	7,3	3,2	2,0	
VOC	öre/km	0,1	0,1	0,6	0,2	0,0	
NO _x	öre/km	0,9	0,9	4,2	0,9	1,1	
Buller	öre/km	448	448	448	448	365	115
Summa – Uppsala	öre/km	451	451	460	452	368	115

Som framgått av resonemanget ovan är emissionerna väldigt låga för Euro VI bussar. Följaktligen är det inte förvånande att även miljökostnaderna blir låga. NO_x och partiklar står för de högsta kostnaderna medan VOC bara står för mindre än ett öre per km.

Kostnaderna för buller är väsentligt mycket högre än för emissionerna. Exempelvis i Stockholms innerstad står buller för 98 % av den totala ASEK kostnaden för emissioner och buller. Författarna gör ingen värdering av varför utfallet blir just detta.

Intervjuer och enkätundersökningar har gjorts med fordonstillverkarna (Volvo, Scania, MAN och Mercedes), huvudmännen (SL, Västtrafik, Östgötatrafiken, Västtrafik och Dintur), operatörerna (Arriva, Keolis, Nobina) samt organisationerna (Sveriges Bussföretag och Svensk Kollektivtrafik). Totalt 14 aktörer inom branschen fick möjlighet att svara på enkätfrågorna. Totalt inkom svar från 11.

Sammanfattningsvis så kan man säga att svaren spretar lite mellan olika aktörer men några "trender" kan ändå hittas.

- Elektrifiering kommer starkt, både enligt bussbolag och operatörer. Nu mest som hybrider men i framtiden troligen som rena elfordon i stadstrafik.
- Biogasen är på tillbakagång på många håll (dock inte alla). Främsta anledningen är den relativt övriga alternativ låga energiverkningsgraden.
- Etanol är svårbedömd. Inga nyregistreringar på flera år. Detta kan dock komma att ändras eftersom etanolen ger hög klimatnytta. Fler aktörer har kommit in på bränslemarknaden varför man kan förvänta sig en prispress på bränslet.
- HVO är det som de flesta vill ha som bränsle. Mycket likt diesel och man får inte de nackdelar som FAME ger i form av bland annat tätare serviceintervall.
- Alternativa drivmedel som tidigare diskuterats såsom metanol och DME är det inte många som pratar om längre.

"De nya modeorden nu stavas El, hybrid och HVO."

Denna studie ger en "ögonblicksbild" av situationen i dag vad gäller emissioner och bränsleförbrukning för ett antal bussar. När man diskuterar framtida teknik som t.ex. bränslecell-drivna bussar eller elbussar måste man beakta att den tekniken ännu inte är färdigutvecklad. När tekniken – förmodligen om några år – är mogen för en storskalig kommersialisering kommer också den konventionella tekniken att ha utvecklats vidare. Det är som att skjuta mot ett rörligt mål. När det gäller hybrider och laddhybrider har de nyligen nått en nivå där storskalig kommersialisering inletts, eller står för dörren.

Uppskattningar av tekniskt möjliga nivåer i framtiden har gjorts för NO_x. Det skulle vara tekniskt möjligt att i nästa steg (som kanske kommer att kallas Euro VII) sätta ett lägre gränsvärde än i Euro VI. Bedömningen är att den nivån också kan nås med andra drivmedel än diesel och framtida EU lagstiftning syftar ju mot drivmedels- och teknikneutralitet. På samma sätt kan också en något lägre nivå för partikelemissioner (PM & PN) vara möjlig med brasklappen att mätmetoden för PM har sina begränsningar på riktigt låga nivåer.

Hybridtekniken är fortfarande tämligen ny och det är därför rimligt att tro att den kan utvecklas vidare. Det gäller dels effektivisering, dels också att utnyttja tekniken för minskning av emissioner. För närvarande erbjuder de stora bussleverantörerna på den svenska mark-

naden enbart hybridfordon med dieselmotorer. Det är emellertid fullt möjligt att kombinera hybridisering även med motorer för andra drivmedel och där förbränningsmotorn t.ex. är en ottomotor. Den naturliga "förlängningen" av hybridtekniken är att gå till en laddhybrid. Dock krävs här betydligt större batterier med ökade kostnader och vikt som följd. Kombination med snabbladdning är också en möjlighet till förbättring. Kostnadsaspekten är dock viktig och det är inte klart ifall kostnad och nytta står i proportion till varandra.

Vanliga stadsbussar orsakar omfattande bullerstörningar vilket innebär stora samhällsekonomiska kostnader. Bussar, som går uteslutande på förbränningsmotorer, kan kosta samhället omkring 4 kr/km för buller i tätorter, medan bussar med enbart elmotor kan kosta omkring 1 kr/km. Störningskostnaderna minskar med cirka 25 % för varje dB tystare buss. Tystare bussar kan således avsevärt minska de samhällsekonomiska kostnaderna. Med andra ord bidrar de till en trivsammare stad där människor hellre vill bo, mötas och verka samt till bättre hälsa och prestationer. Tystare stadsbussar ökar möjligheterna att förtäta staden och samtidigt bygga ut kollektivtrafiken och minska bullret. Vidare kan de minska behovet av bullerskyddsåtgärder såsom mer dämpande fönster och beläggningar. Tystare bussar får kosta mer och ändå vara en god affär för alla; staden, medborgarna, näringslivet och fordonsindustrin. Den nya förordningen (EU) nr 540/2014, med nya gränsvärden för ljudnivåer fram till 2027, kommer dock inte att driva utvecklingen för tystare bussar jämfört med dagens stadsbussar. De flesta stadsbussar klarar redan de nya gränsvärdena. Framöver kan teknikutvecklingen, t ex med bussar helt eller delvis drivna av elmotor, minska bulleremissionerna än mer. Bussar med förbränningsmotorer har också blivit tystare då de nya Euro-avgaskraven resulterat i partikelfilter som dämpar avgasbullret. Det finns därför goda möjligheter för köpare att fortsätta ställa strängare bullerkrav än vad lagstiftningen ger uttryck för. Det blir också lättare att ställa väl avvägda krav framöver. Förordningen uppmanar fordonstillverkare och fordonsdistributörer att presentera varje fordon's ljudnivå.

Tidigare ansågs generellt att fordon som drivs med alternativa drivmedel gav lägre emissioner än konventionella dieseldrivna fordon. I dag tycks situationen i en del fall vara nästintill omvänd eller åtminstone den att alla drivmedel ger ungefär samma emissioner. Frågan är i vilka applikationer alternativa drivmedel bäst kommer till sin rätt. Det skulle t.ex. kunna vara att köra biogasbussar i tät stadstrafik där avgasreningen för NO_x förmodligen fungerar bättre än till konventionella dieselbussar. Övriga emissionskomponenter kan dock vara högre för biogas.

Den kvarstående stora fördelen med biodrivmedel tycks vara utsläppen av klimatgaser. Detta gäller under förutsättning att drivmedlen produceras på "bästa" sätt och att fordonen är energieffektiva.

Intresset för etanol är för närvarande lågt och drivmedel som FAME och HVO tycks ha tagit över marknaden. Drivmedlen kan blandas in i diesel eller köras som "rena" drivmedel. Emissionsmässigt ligger de nära diesel. Det är framförallt enkelt att använda FAME och HVO. Ibland har också enkelheten ett pris.

Generellt har resultaten i studien visat att avgasemissionerna från alla alternativen är förhållandevis låga. Det återspeglar sig också i låga samhällsekonomiska kostnader räknat enligt ASEK. Rent tekniskt sett skulle avgaskraven i framtiden kunna sättas ännu något strängare än i Euro VI. Studier i USA har också visat att emissionerna av hälsofarliga och i dag icke reglerade avgaskomponenter minskat på liknande sätt som de reglerade emissionerna. Ofta ligger nivåerna för många hälsofarliga avgaskomponenter kring eller under detektionsgränsen för dagens mätmetoder. Det går inte längre att påvisa att dieselavgaser från moderna motorer till tunga fordon ger cancer hos försöksdjur. Kanske borde fokus därför förskjutas mot att tillse att reningstekniken fungerar väl under fordonets användbara livslängd (hållbarhet), samt i "verklig trafik" (t.ex. via ombordmätning), i stället för att ytterligare skärpa nivåerna i certifieringscykeln.

Ett kvarstående problem med förbränningsmotorer är utsläppen av växthusgaser (främst CO₂). Ökad energieffektivitet minskar dessa utsläpp men även substitution genom biodrivmedel och/eller el från förnybara källor i elfordon och laddhybridfordon är tänkbare lösningar. Rimligtvis borde fokus i framtiden öka på effektivisering och minskade utsläpp av växthusgaser, snarare än att ytterligare minska avgasemissionerna.

Ett annat kvarstående problem är buller, som enligt resultaten i den här studien ger väsentligt högre samhällsekonomiska kostnader än avgasemissioner. Subjektivt kan tyckas att samhället relativt sett inte ställer lika långtgående krav på buller som på avgaser, varken via lagkrav eller i upphandlingar. Bussar som drivs med enbart el bullrar avsevärt mindre än bussar som drivs med förbränningsmotor men kostar i dag betydligt mer än konventionella bussar. Sannolikt skulle även buller från bussar där förbränningsmotor används kunna minskas men även här är sådana åtgärder förknippade med ökade kostnader. Nämnade kostnader borde vägas mot kostnader för bullersaneringar och andra åtgärder för att minska störningarna från buller.

Resultaten i den här studien visar på lägst kostnad för bussoperatören med konventionella dieselbussar. Allra lägst är kostnaden när de drivs med FAME men här kan de lägre priser på diesel som varit fallet sedan slutet av 2014, samt ändrad beskattning av FAME, påverka kostnadsbilden jämfört med förutsättningarna i studien. Dieselhybridbussar har enligt resultaten i den här studien högre kostnad än konventionella dieselbussar men lägre kostnader än biogas och etanol. Några av intervjupersonerna hävdar lägre kostnader för hybridbussar än för dieselbussar. Klart är att hybridbussarna för närvarande kostar betydligt mer i inköp, vilket måste kompenseras genom lägre bränsleförbrukning. Bränsleförbrukningen borde generellt följas upp bättre för att ge underlag till kostnadsberäkningar, samt även för att kunna prioritera i vilken trafik hybrider kommer bäst till sin rätt. Hybriderna är för tillfället i en tidig fas av introduktion, vilket gör att kostnadsbilden kan förändras framgent.

Någon trovärdig beräkning av kostnadsbilden för eldrivna bussar kan inte göras i dag. De beräkningar som gjorts i denna studie ger en *indikation* på att elbussarna ännu inte är ekonomiskt konkurrenskraftiga jämfört med konventionella bussar. Detta är i ett scenario som

förutsätter tämligen stora batterier. Kanske kan andra lösningar, t.ex. snabbbladdning och mindre batterier, kan ge bättre förutsättningar i framtiden. Någon enighet om vilket alternativ bland eldrivna bussar som är det mest fördelaktiga tycks i alla fall inte finnas i dag.

ENGLISH SUMMARY

Ecotrafic was commissioned by the Swedish Transport authority to compile a criteria document about city buses in Sweden. This criteria document shall be the base report for a short memorandum, which in turn shall be used as an aid and support in procurement of city buses. Focus for the work has been on city buses with 2 axles corresponding to Euro VI class².

The authors of the study have been faced with a number of difficulties. It has been difficult to obtain data on prices, fuel consumption, emissions and other relevant information from the stakeholders in this business. This has led to that considerable calculations and engineering assessment have been necessary to carry out the work.

About 6 % of the passenger transport work in Sweden is by bus. The transport work is dominated by passenger cars and this transport account for over 76 % of the transport work in the country. Over 50 % of the trips in public transportation are by bus. There are 7 000 to 8 000 city buses in operation in Sweden. The youngest vehicles in Sweden are buses and the median age for a bus is about 4 years. In comparison, the median age for a passenger car is 9 years and 7 years for a truck. Numbers of passenger cars, trucks and inhabitants are relatively constant over time. A typical mileage for a 2-axle city bus is about 60 000 km annually and the average fuel consumption is about 42 litres per 100 km.

In a comparison between different types of fuels and drive systems (incl. hybrids), technology neutrality is important. This means in plain language that one should not compare apples and oranges, for example, that one bus has catalyst and the other does not.

Any vehicle uses an energy converter of some kind. In this case, the energy converters are otto and diesel engines as well as electric motors. Energy converters can be combined with a conventional transmission or a hybrid system.

The difference between Euro V and VI regarding fuel consumption is small and the fuel consumption can actually be somewhat reduced for Euro VI in the future with further technical development. For biogas, Euro VI can only be met with three-way catalyst and stoichiometric combustion. This results in increased fuel consumption in relation to the older gas engines with lean-burn combustion. There is potential for reducing the fuel consumption also on gas engines but a lot of these measures have already been implemented. An ethanol engine for Euro VI is not commercial at the moment. In order to meet Euro VI with ethanol a particle filter optimized for ethanol is probably needed. It should be technically feasible to achieve this. The main advantage of hybrid buses is the lower fuel consumption compared to conventional diesel buses. Regarding exhaust emissions, there are not as obvious advantages. Some parameters indicate lower emissions others higher. In the future, there may be syner-

² In this report, designations with Roman numerals are throughout used for emission standards for engines in heavy-duty vehicles and Arabian numerals are used for emission standards for light-duty vehicles.

gy effects that can provide some reduction of emissions but today there is no basis for such conclusions.

The fuels currently used in the Swedish city buses are:

- HVO (hydrated non-fossil oil)
- Diesel fuel
- ED95 (ethanol)
- Methane gas, as natural gas and biogas
- Electricity

In this work, we have used life cycle data in the form of key factors from the Swedish Energy Agency. These data should be considered as a sort of average of the biofuels used in Sweden. (Actual LCA values can thus, be both better and worse than the data used in this study.) The comparison is carried out with diesel as base, which represents 100% (Figure S.1). The reduction in emissions is presented on a WTW (Well to Wheel) base.

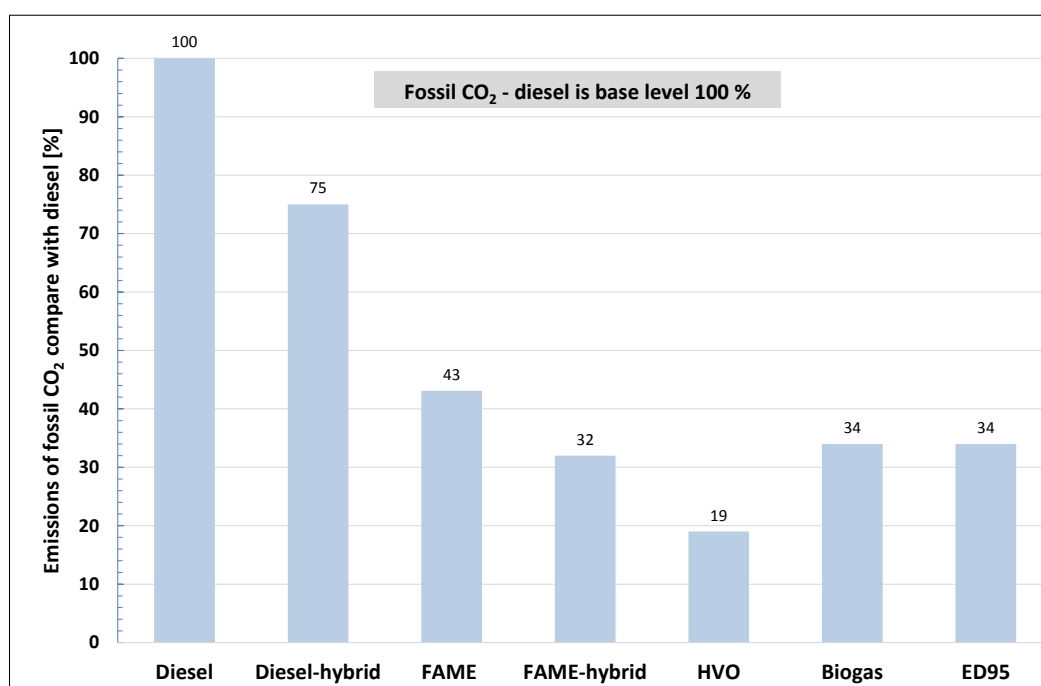


Figure ES.1. Fossil CO₂ in a WTW perspective

In a WTW perspective, with the conditions and assumptions made in this work, the greatest climate benefits is accomplished with HVO fuel.

The relative fuel consumption (in diesel equivalents) for the various buses has been calculated based on test data from buses and is shown in Table ES.1.

Table ES.1. Relative fuel consumption

Fuel/ drivetrain	Relative fuel consumption
Diesel	100 %
Methane gas	125 %
Ethanol, ED95	100 %
Diesel hybrid	75 %

Emission factors for the various buses are calculated using certification data for emissions (g/kWh) and the work the engine produces (kWh/km) as base. The results indicated per kilometre driven and shown in Table ES.2.

If one neglects CO and HC/NMHC, the emission levels are actually quite similar for all the options in Table ES.2. The differences between diesel and diesel hybrid buses should not be interpreted as "real" differences due to technology, but as engine-to-engine scatter. Today only the engine is certified, which is not entirely relevant hybrid systems. Biogas stands out due to natural causes by higher emissions of methane (CH₄) than the other options and it has also higher particulate emissions (PM). In the latter case, the level estimated is based on chassis dynamometer tests on two different buses, which is a test procedure that differs from certification tests on engines that are the basis for the other engines. Therefore, the value for PM for gas is shown in parentheses. Number of particles (PN) is not regulated for gas-fuelled engines and since few data on modern gas engines are available, the authors have chosen not to estimate the PN level. Any data of an ethanol-powered bus engine certified for Euro VI is not available, so in this case, all data has been estimated. Particle filters will be needed for the ethanol engine to fulfil the particle requirements in Euro VI.

Table ES.2. Emission factors for buses

Fuel/ hybrid	CO mg/km	NMHC mg/km	CH₄ mg/km	NO_x mg/km	PM mg/km	PN #/km
Diesel	118	37	0	472	4,1	2,9E+10
Hybrid	30	0	0	594	3,7	2,9E+10
Gas	612	192	339	472	(13,3)	n.d.
Etanol	(295)	(74)	(0)	(472)	(5,9)	(7,4E+10)

In this study, we have used the average fuel prices under 2014. More recently, prices have declined so the prices we have used may possibly be considered as too high. Where prices go, no one can predict, so for that reason we have chosen to retain the previously assumed prices. LCC costs are shown in Figure ES.2.

LCC costs are calculated for 2-axle, 12-meter low-floor buses, and assuming that the buses run 60 000 km annually for 10 years. As a comparison, the greatest cost of the bus operation is the cost of the driver. A conventional diesel bus costs about SEK 8,60 per km (LCC), while the cost of the driver is about SEK 15 per km.

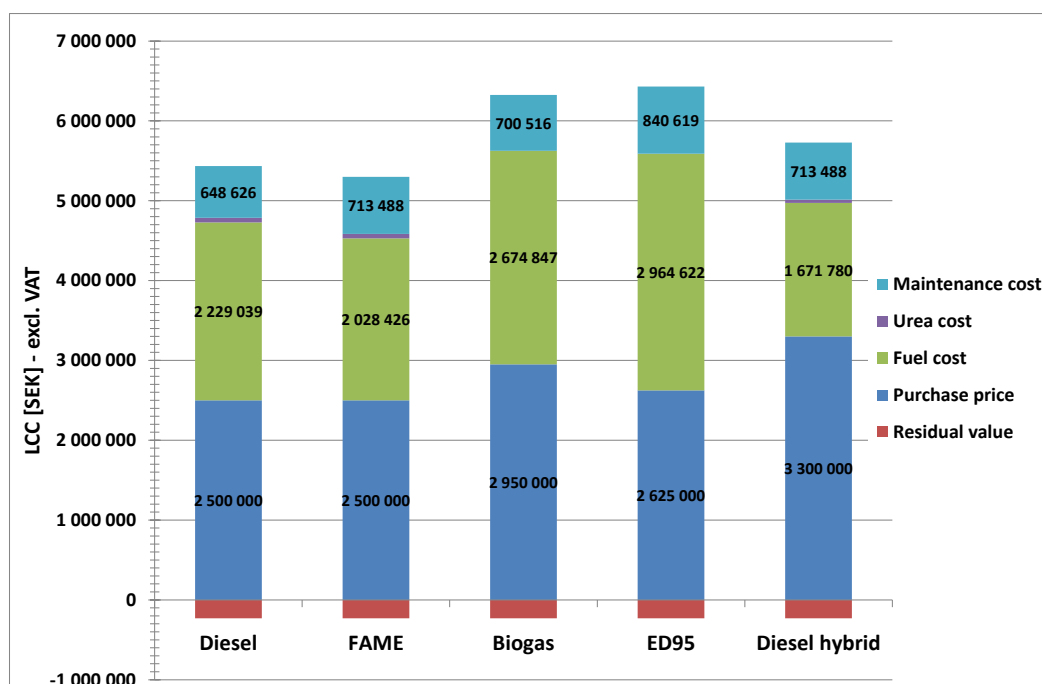


Figure ES.2. Adjusted present value LCC costs (SEK - ex VAT) for various city buses. Fuel costs include taxes but not VAT.

One can assume that some part of the tax on fuels include socioeconomic costs, for example for exhaust emissions and noise. It has, however, remained outside the scope of the study to estimate the share of the tax that this comprises. Therefore, the authors have chosen *not* to sum up the bus owner's costs and the costs for exhaust emissions and noise. In Table ES.3, different costs for the bus owner have been summarized.

Table ES.3. Summary of costs for the bus owner

Cost element	Unit	Diesel	FAME	Biogas	ED95	Hybrid	El. bus
Purchase price	SEK/km	4,17	4,17	4,92	4,38	5,50	X
Residual value	SEK/km	-0,38	-0,38	-0,38	-0,38	-0,38	X
Fuel cost	SEK/km	3,72	3,38	4,46	4,94	2,79	X
Urea cost	SEK/km	0,09	0,09	0,00	0,00	0,04	X
Maintenace cost	SEK/km	1,08	1,19	1,17	1,40	1,19	X
Sum		8,67	8,45	10,16	10,33	9,13	X

Overall, the cost for the bus owner is dominated by purchase cost and fuel cost. Maintenance cost is also a large cost item. Therefore, it is readily understood that if any of the vehicles are affected by higher maintenance costs than other vehicles, it can result in significant cost increases.

In Table ES.4, the environmental costs for the buses, including ASEK values for exhaust emissions and noise, are summarized. Three cities have been chosen for comparison. Kristianstad is the reference city for ASEK and in addition, Stockholm inner city and Uppsala have been

selected. Unfortunately, there is no breakdown of noise separately for the various buses with conventional internal combustion engine, since it was not possible to carry out such calculations. For hybrid buses, it has been assumed that they are run 75 % of the time as a bus with a normal combustion engine and 25 % of the time on the electric motor alone. When the combustion engine is run in a hybrid bus, it is assumed that the noise level (on average) will be the same as for a conventional bus.

Table ES.4. Summary of environmental costs

Cost element	Unit	Diesel	FAME	Biogas	ED95	Hybrid	El. bus
ASEK – Kristianstad							
Particles	öre/km	1,1	1,1	3,5	1,5	1,0	
VOC	öre/km	0,2	0,2	1,1	0,4	0,0	
NO _x	öre/km	4,2	4,2	4,2	4,2	5,3	
Noise	öre/km	360	360	360	360	294	97
Sum - Kristianstad	öre/km	365	365	369	366	301	97
ASEK - St:holm, inner city							
Particles	öre/km	5,0	5,0	16,2	7,2	4,5	
VOC	öre/km	0,3	0,3	1,4	0,5	0,0	
NO _x	öre/km	1,8	1,8	0,0	1,8	2,3	
Noise	öre/km	415	415	415	415	333	87
Sum – St:holm, inner city	öre/km	422	422	433	425	340	87
ASEK - Uppsala							
Particles	öre/km	2,3	2,3	7,3	3,2	2,0	
VOC	öre/km	0,1	0,1	0,6	0,2	0,0	
NO _x	öre/km	0,9	0,9	4,2	0,9	1,1	
Noise	öre/km	448	448	448	448	365	115
Sum - Uppsala	öre/km	451	451	460	452	368	115

As indicated in the discussion above, emissions are very low for Euro VI buses. Consequently, it is not surprising that also the environmental costs are low. NO_x and particulates account for the highest costs, while VOCs only comprise less than one öre (Swedish penny) per kilometre.

The cost for noise is significantly higher than for emissions. For example, in Stockholm's inner city noise comprise 98 % of the total ASEK cost of emissions and noise. The authors make no assessment of as to why the outcome will be just that.

Interviews and surveys were performed with the vehicles manufacturers (Volvo, Scania, MAN and Mercedes), public transportation authorities (SL, Västtrafik, Östgötatrafiken, Västtrafik and Dintur), operators (Arriva, Keolis, Nobina) and operator's organizations (the Swe-

dish Bus and Coach Federation and the Organisation of Swedish Public Transport). A total of 14 stakeholders in the business were given the opportunity to respond to the questionnaire. Total received replies were 11.

In conclusion, one can say that the answers scatter a bit between different actors, but some "trends" can still be found.

- Electrification is coming strongly, according to both the bus companies and operators. Currently, mostly as hybrids but in the future probably as pure electric vehicles in urban traffic.
- Biogas is on decline in many (though not all) regions. The main reason is the low energy efficiency in relation to other alternatives.
- Ethanol is difficult to assess. No new registrations in several years. However, this can change since ethanol provides high climate benefit. More players have entered the fuel market why one can expect a price pressure on the fuel.
- HVO is what most actors want as fuel. Very similar to diesel and it does not have the disadvantages that FAME gives in the form of, among other things, more frequent service intervals.
- Alternative fuels previously discussed, such as methanol and DME, are not discussed by many stakeholders anymore.

"The new buzzwords are now spelled electric, hybrid and HVO."

This study provides a "snapshot" of the situation today in terms of emissions and fuel consumption for a number of buses. When discussing future technologies, such as fuel cell powered buses and electric buses, one must take into account that this technology is not yet fully developed. Once the technology – probably in a few years – is mature for a large-scale commercialisation, conventional technologies will also have been further developed. It is like aiming at a moving target. Regarding hybrids and plug-in hybrids, they recently reached a level where large-scale commercialisation has been initialized or is imminent.

Estimates of technically feasible levels in the future have been made for NO_x. It would be technically feasible in the next step (which might be called Euro VII) to set a more strict limit than in Euro VI. The assessment is that the level can also be reached with other fuels than diesel fuel and future EC legislation strives for neutrality regarding fuel and technology. Likewise, also a slightly lower level of particle emissions (PM & PN) could be possible with the constraint that measurement methodology for PM has its limitations at very low levels.

The hybrid technology is still relatively new and therefore, it is reasonable to believe that it can be further developed. This applies to efficiency, and also to utilize the technology for reduction of emissions. Currently, the larger bus manufacturers only market hybrid vehicles on the Swedish market with diesel engines. However, it is entirely feasible to combine hybridization also with engines for other fuels and where the internal combustion engine, for example, is an otto engine. The natural "extension" of the hybrid technology is to move to a

plug-in hybrid. However, this requires significantly larger batteries with higher cost and weight as a result. Combination with quick charge is also a scope for improvement. The cost aspect is, however, important, and it is not clear if costs and benefits are in proportion to one another.

Conventional city buses cause widespread noise disturbance, which implies large costs to the society. Buses, which run exclusively on internal combustion engines, can cost society about 4 SEK/km of noise in urban areas, while buses operating only on electric motors can cost about 1 SEK/km. The cost of noise disturbance decreases by approximately 25 % for each dB of noise reduction on a bus. Quieter buses can thus significantly reduce the socioeconomic costs. In other words, they contribute to a pleasant city where people would rather live, get together and work as well as to improved health and performance. Quieter city buses increases the opportunities to densify the city and at the same time expanding public transport and reduce noise. Furthermore, they reduce the need for noise protective measures, such as better noise reduction for windows and coatings. Quieter buses can be allowed to cost more and still be a good deal for everyone; the city, the citizens, the business sector and the automotive industry. The new Regulation (EU) No 540/2014, with new maximum noise levels set until 2027 will, however, not push the development of quieter buses compared to today's city buses. Most city buses already pass the new limits. Looking ahead, the development of technology, for example, buses that are fully or partly powered by electric motors will reduce noise emissions even more. Buses with internal combustion engines have become quieter when the new European emission standards resulted in particulate filters that reduce exhaust noise. Therefore, there are good opportunities for buyers to continue to impose stricter noise standards than the law expresses. It will also be easier to set proportionate requirements in the future. The regulation calls on vehicle manufacturers and vehicle distributors to state each vehicle's noise level.

In the past, vehicles powered by alternative fuels considered were generally considered to have lower emissions than conventional diesel vehicles. Today, the situation seems, in some cases, to be almost the opposite, or at least all fuels have about the similar emissions. The question is in which applications alternative fuels are best utilized. It could, for example, be to use biogas buses in congested city traffic where the exhaust emission control system for NO_x most likely works better than in conventional diesel buses. Other emission components could, however, be higher for biogas.

The remaining major advantage of biofuels seems to be emissions of greenhouse gases. This is on the condition that the fuels produced in the "best" way and that the vehicles are energy efficient.

Interest in ethanol is currently considered low and fuels as FAME and HVO seems to have taken over the market. These fuels can be blended into diesel fuel or used as "neat" fuels. Regarding emissions, they are close to diesel fuel. It is particularly easy to use FAME and HVO. Sometimes also the simplicity has a price.

Generally, the results in the study have showed that exhaust emissions from all the options are relatively low. It is also reflected in the low socioeconomic costs calculated according to ASEK. Technically, the exhaust limits in the future could be set even somewhat stricter than in Euro VI. Studies in the USA have also shown that the emissions of hazardous and currently non-regulated exhaust gas components have been reduced in a similar way as the regulated emissions. Often, the levels of many harmful exhaust components are at, or below, the detection limit of current measurement methods. It is no longer possible to determine that diesel exhaust from modern engines in heavy-duty vehicles cause cancer in laboratory animals. Maybe the focus should therefore be shifted towards ensuring that the emission control technology works well during the vehicle's useful life (durability), as well as in "real traffic" (e.g. via on-board measurement), instead of further lowering the levels in the certification test cycle.

A remaining problem with combustion engines is the emissions of greenhouse gases (mainly CO₂). Increasing energy efficiency reduces these emissions but also the substitution by bio-fuels and/or electricity from renewable sources in electric vehicles and plug-in hybrid vehicles are possible solutions. Most reasonably, the focus in the future should be to increase the efficiency and reduce greenhouse gas emissions, rather than further reducing exhaust emissions.

Another remaining problem is noise, which according to the results of this study, causes substantially higher socioeconomic costs than exhaust emissions. Subjectively, it may seem that the society has not such stringent requirements on noise as on exhaust emissions, neither by law or in common purchases. Buses that run on electricity alone are considerably less noisy than buses powered by internal combustion engines but today, they cost significantly more than conventional buses. Most likely, noise from buses where internal combustion engines are used could be reduced but here the measures are associated with increased costs. Those costs should be weighed against the costs of noise abatement and other measures to reduce disturbance from noise.

The results of this study show lowest cost for the bus operator with conventional diesel buses. The cost is lowest when running on FAME, but here the lower prices for diesel fuel that have been the case since the end of 2014, and a change in the taxation of FAME, affect costs as compared to the conditions in the study. Diesel hybrid buses have, according to the results of this study, higher cost than conventional diesel buses, but lower costs than biogas and ethanol. Some of the interviewees claim lower costs for hybrid buses than for diesel buses. It is clear that hybrid buses currently cost considerably more to purchase, which must be compensated by lower fuel consumption. The fuel consumption should generally be monitored better to provide a basis for cost estimates, and also to enable prioritizing in which traffic hybrids are best utilized. Hybrids are currently in an early phase of introduction, which implies that the cost picture may change in the future.

No reliable estimate of the cost structure of electric buses can be made today. The calculations carried out in this study give an *indication* that electric buses are not yet cost competitive with conventional buses. This is in a scenario that requires relatively large batteries. Perhaps other solutions, e.g. quick charge and smaller batteries, can provide better conditions in the future. Any consensus about which option among electric buses is the most advantageous does not seem to be on hand today.

BIBLIOGRAFI

Beställare	Trafikverket	Beställningsnummer	4738
Beställningsdatum	2014-09-08	Slutdatum enligt beställning	2015-02-15
Ansvarig hos beställare	Magnus Lindgren	Projektnummer	7078
Ansvarig hos Ecotrafic	Lars Eriksson	Rapportering	Rapport
Avvikelser		Provningsplats	Ingen provning
Rapport språkgranskad	Nej	Rapport godkänd av	
Rapportnummer	157087	Rapporteringsdatum	2015-05-11
Författare	Peter Ahlvik och Lars Eriksson		

FÖRKORTNINGAR OCH NOMENKLATUR

Förkortning	Förklaring med svensk översättning i förekommande fall
ACES	Advanced Collaborative Emissions Study. Projekt i USA med syfte att undersöka potentiella hälsoeffekter av nya motorsystem och drivmedel.
Adblue	Tillsatsmedel för SCR (se förkortning) baserat på urea.
ASEK	Arbetsgruppen för samhällsekonomiska kalkyl- och analysmetoder inom transportområdet. En myndighetsgemensam samrådsgrupp för utveckling av principer för samhällsekonomisk analys och kalkylvärden.
AVAS	Akustiskt fordonsvarningssystem (gäller el- och elhybridfordon)
BTH	Blekinge Tekniska Högskola
CI	Compression ignition, alltså kompressionständning. Betecknar normalt en dieselmotor. Notera att en dieselmotor kan drivas med andra drivmedel än dieselolja.
CO	Kolmonoxid
CONCAWE	Conservation of Clean Air and Water in Europe. Oljebolagens europeiska organisation för miljö, hälsa och säkerhet inom raffinering och distribution.
CPC	Condensation Particle Counter (equivalent to CNC)
DFNG	Dual-Fuel Natural Gas. Tvåbränslemotor som drivs med metangas och dieselolja.
DI	Direct Injection (direktinsprutning)
DING	Direct Injection Natural Gas. Direktinblåsning (insprutning) av gas. Tändning sker med dieselolja eller glödstift.
DME	Di-methyl ether. Dimetyleter, den enklaste etern)
DPF	Diesel Particle Filter (dieselpartikelfilter)
EC	Elemental Carbon, elementärt kol
ED95	Etanolbränsle för dieselmotorer
EGR	Exhaust Gas Recirculation (avgasåterföring)
EPA	Environmental Protection Agency (USA: Naturvårdsverk)
ETC	European Transient Cycle. Den transienta europeiska körcykeln som användes t.o.m. Euro V.
EUCAR	European Council for Automotive R&D. De större europeiska biltillverkarnas organisation för forskning och utveckling.
Euro X	Avgaskrav i EU, e.g. Euro I, Euro II, etc... Vad gäller löpnummer så används ro-

	merska siffror för motorer till tunga fordon och arabiska siffror för lätta fordon.
FAME	Fatty Acid Methyl Esters.
FEV	Konsultföretag inom området motorer och fordon med huvudkontor i Aachen, Tyskland och med utvecklingscentra i flera andra länders.
GPF	Gasoline Particle Filter (motsvarar dieselpartikelfilter för bensinmotorer)
HC	Kolväten
HVO	Hydrogenated Vegetable Oil (hydrerade växtoljor)
JEC	Samarbete mellan JRC, EUCAR och CONCAWE inom områdena fordon och drivsystem, energi och drivmedel i Europa (se övriga förkortningar i listan)
JRC	The Joint Research Centre, a research based policy support organisation and an integral part of the European Commission.
LCA	Life Cycle Assessment (livscykelanalys)
LCC	Life Cycle Cost (livscykelkostnad)
Lean-burn	Mager förbränning, $\lambda > 1$.
N ₂ O	Kvävemonoxid (lustgas)
Nanopartiklar	Partiklar mindre än 50 nm (0,050 µm). Lite olika definitioner förekommer.
NGV	Natural Gas Vehicle
NMHC	Non-Methane Hydrocarbon
NO	Kvävemonoxid, ofta refererad till som kväveoxid
NO ₂	Kvävedioxid
NO ₂	Kvävedioxid
NO _x	Kväveoxider, dvs. summan av NO och NO ₂ räknat med molekylvikten för den sistnämnda
OC	Organic Carbon, organiskt kol
OC	Oxidation Catalyst, oxidationskatalysator
PING	Pilot Injection Natural Gas. Tändning av gas med liten mängd dieselolja.
PM	Particulate Matter
PN	Number of particles. Antal partiklar. Definitionen är 23 nm för 50% cut-off.
RME	Rape Seed Methyl Ester (rapsolja omförestad med metanol)
RWTH	Rhein-Westfälische Technische Hochschule
SAE	Society of Automotive Engineers
SCB	Statistiska Centralbyrån
SCR	Selective Catalytic Reduction. Selektiv katalytisk reduktion av NO _x , vanligen med urea som tillsatsmedel.

SI	Spark Ignition (gnisttändning)
SIF	Soluble Inorganic Fraction (löslig oorganisk fraktion)
SMP	Svensk maskinprovning
SO ₂	Svaveldioxid
TCO	Total Cost of Ownership (total ägandekostnad)
THC	Total HydroCarbon emissions. HydroCarbon (HC) emissions including methane (totala kolväten som även inkluderar metan)
TTW	Tank-To-Wheel (från tank till hjul)
TWC	Stökiometrisk förbränning ($\lambda=1$) med trevägskatalysator för avgasrening.
UDDS	Urban Dynamometer Driving Schedule. En amerikansk körcykel utvecklad av EPA (se förkortning) för tunga fordon på chassidynamometer.
UITP	International Association of Public Transport, den internationella organisationen för kollektivtrafik
WHDC	World Harmonised Duty Cycle
WHSC	World Harmonised Stationary Cycle
WHTC	World Harmonised Transient Cycle
WHVC	World Harmonised Vehicle Cycle
VOC	Flyktiga organiska föreningar
VTR	vägtrafikregistret
VTT	Teknologiska Forskningscentralen i Finland
WTT	Well-To-Tank (från källa – eller resurs – till tank)
WTW	Well-To-Wheel (från källa – eller resurs – till hjul)

1 INTRODUCTION

I detta kapitel ges en bakgrund till studien samtidigt som det görs ett försök att sätta in studien i sitt sammanhang. Det finns också redan tidigare utförd studie som bör diskuteras lite mer i detalj, då många av den studiens syften också finns för föreliggande studie.

1.1 Bakgrund: bussar i ett lite större sammanhang

Det finns många fördelar med bussar framför andra trafikslag. Nedan diskuteras endast ett litet urval av dem. Syftet har inte varit att göra någon generell jämförelse mellan olika trafikslag när det gäller transportarbete men några exempel kan visa en del av fördelarna med bussar.

Exempelvis är bussar ett mycket mer effektivt trafikslag än personbilar när det gäller att utnyttja den befintliga infrastrukturen. Bussar är heller inte så beroende av annan speciell infrastruktur som t.ex. spårbunden trafik. Av samma skäl har bussarna också mycket större flexibilitet än spårbunden trafik – det finns helt enkelt mycket fler vägar än spår.

En annan fördel med bussar jämfört med personbilar är att de är mycket mer energieffektiva (räknat per personkilometer). Förvisso har bränsleförbrukningen minskat väsentligt för nya personbilar de senaste åren – relativt sett mer än för bussar – men bussarna är likväl betydligt bättre i detta avseende. I rusningstrafik är fördelen för bussarna ännu större eftersom medelbeläggningen då är låg för bilarna (drygt 1 person per bil) men hög för bussarna.

När det gäller miljöpåverkan och speciellt utsläpp av hälsofarliga emissionskomponenter är fördelarna för bussar inte lika uppenbara. Enligt en, åtminstone tidigare rådande, uppfattning karakteriseras bussar, som oftast drivs med dieselmotorer, av höga avgasemissioner av NO_x och partiklar. För snart 15 år sedan gjorde Ecotrafic en omfattande studie för att fastställa skillnader mellan bensindrivna³ personbilar och bussar vad gäller emissioner och hälsoeffekter [1]⁴. Denna studie är naturligtvis för gammal för att i dag vara fullt relevant i alla avseenden men en del slutsatser är ändå fortfarande av intresse i dag. En viktig aspekt som kan nämnas i sammanhanget är att hänsyn togs till medelbeläggningen på fordonen, dvs. emissioner och hälsoeffekter utvärderades per personkilometer. Även effekter av klimat (utomhustemperatur) togs i beaktande – en nog så viktig parameter i vårt nordliga land. Bussar har här en mycket stor fördel jämfört med personbilar eftersom körsträckan per kallstart är så oändligt mycket längre i bussfallet än i personbilsfallet. Sammanfattningsvis kan man säga att bussen "vann" över personbilen när det gäller de allra flesta emissionskompo-

³ När studien gjordes utgjorde dieslbilar en försvinnande liten andel av personbilsförsäljningen i Sverige. De senaste åren har detta förhållande dock ändrats kraftigt, då mellan hälften och två tredjedelar av försäljningen varit dieslbilar.

⁴ Siffror inom hakparentes avser referens som finns i referenslistan i slutet av rapporten.

nenter samt effekter på hälsa och miljö. Det gäller speciellt viktiga hälsoeffekter som bl.a. cancerrisk och ozonbildning. Personbilarna hade dock fördel när det gäller lokalt producerad NO_x även om på den tiden känd teknik för bussar som t.ex. etanolbränsle eller diesel med EGR (eftermontering på den tiden) förutsattes. När det gäller lokala partikelemissioner hade dock etanoldrivna bussar och dieseldrivna bussar med partikelfilter en klar fördel framför personbilar. Med dagens förutsättningar ser man att emissionskraven skärpts för båda fordonskategorierna. Relativt sett har dock minskningen varit störst för NO_x från motorer till tunga fordon där numera efterbehandlingsteknik används för dieselmotorer. För gasbussar, som inte fanns med i den nämnda studien, har också trevägskatalysatortekniken introducerats, vilket också gett en avsevärd sänkning av NO_x. Negativt för utsläpp från personbilar har varit den ökade andelen dieslbilar som inte ger lika låga NO_x emissioner som motsvarande bensinbilar. Som medel för flottan torde inte personbilarnas NO_x emissioner ha minskat i samma grad som för bussar, möjligen kan t.o.m. en ökning föreligga, beroende på vilka årtal man jämför med. När det gäller partikelemissioner kommer senare i den föreliggande studien eventuella framsteg vad gäller reningsgrad i partikelfilter för tunga fordon att diskuteras. Sannolikt finns motsvarande förbättringar även för dieseldrivna personbilar. Man bör också notera att även om partikelemissionerna för bensindrivna personbilar är låga i den standardiserade testcykeln är de avsevärt högre vid kallstart vid låga temperaturer och i testcykler med högre belastningar. Den nya tekniken med direktinsprutning av bensin ger också högre partikelemissioner än äldre teknik med indirekt insprutning (som den nämnda studien förutsatte). Det innebär att i verklig trafik, dvs. som ett snitt över fordonets livslängd, torde partikelemissionerna vara betydligt högre för bensindrivna personbilar än för dieseldrivna personbilar. Trenden för partikelutsläpp från bensindrivna bilar är därför ökande under de knappt 15 år som gått sedan Ecotraffics jämförelse mellan buss och bil men den motverkas av en ökande andel dieslbilar. Därför innebär resonemanget ovan för partikelemissioner (utan att några direkta beräkningar gjorts) att bussar med modern teknik fortfarande borde ha en avsevärd fördel för hälsofarliga partiklar än personbilar. Sammanfattningsvis borde alltså bussar fortfarande ha en väsentlig fördel framför personbilar när det gäller de flesta hälso- och miljöeffekter. Med den nämnda studien från Ecotraffic som referens är dock ett förslag att upprepa den studien för att försöka kvantifiera skillnader för dagens fordon.

1.2 Metodik

Metodiken i den här studien avviker något från andra studier. Den beskrivs översiktligt i kapitel 2 (sidan 8).

Syftet har inte varit att ta fram egna ingångsdata rakt av utan att använda tillgängliga data från bl.a. fordonstillverkare och myndigheter vad gäller fordonen och från Energimyndigheten för drivmedel. Detta har varit ett sätt att dels minska omfattningen av arbetet, dels använda data som är validerade och erkända. Det betyder inte nödvändigtvis att de data som

använts är de bästa möjliga eller de mest relevanta; det är bara en av flera olika metodiker att genomföra en studie av det här slaget.

Det är också viktigt att notera att studien fokuserar på dagens tekniknivå, dvs. fordon och drivmedel som finns att köpa. *Studien ger därför en ögonblicksbild av dagens status.* En diskussion om eventuella tänkbara förbättringar av fordonstekniken görs också för framtiden.

1.3 Studie av Blekinge Tekniska Högskola

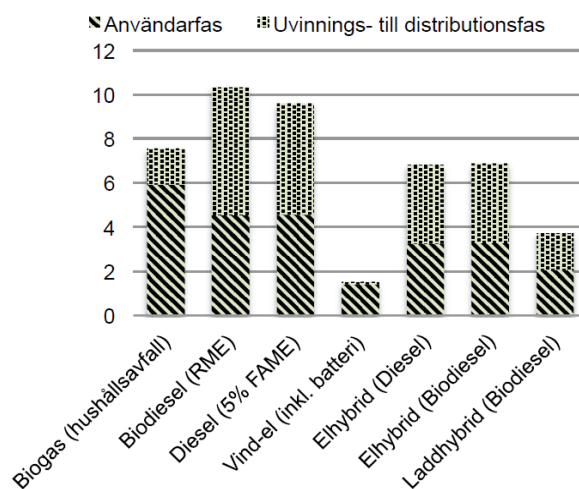
När detta uppdrag initialt diskuteras med Trafikverket nämndes en tämligen ny rapport från Blekinge Tekniska Högskola (BTH), Borén m.fl. [2]. Vid första anblick noterade författarna till föreliggande rapport att den nämnda rapporten omfattade mer eller mindre de flesta av de frågeställningar som diskuterades för denna studie. Ifall allt redan vore utrett hade den föreliggande studien varit mer eller mindre onödig. Rapporten från BTH är ganska väsentlig i sammanhanget och förtjänar att diskuteras mer ingående. Denna studie/rapport benämns framgent BTH-studien, alternativt BTH-rapporten, för enkelhetens skull.

1.3.1 Några exempel på resultat från BTH-studien

Som nämnts ovan omfattar BTH-rapporten de flesta områden och frågeställningar av intresse även för den föreliggande studien. Vid närmare anblick visade det dock sig att många av resultaten i rapporten är något förvånande. Några exempel nämns nedan och förtjänar att diskuteras separat.

I Figur 1 visas resultat för energianvändning per km för användarfas respektive utvinnings- till distributionsfas. I den föreliggande rapporten kommer författarna att använda de engelska förkortningarna TTW (tank to wheel) respektive WTT (well to tank) för samma faser och totalen benämns WTW (well to wheel).

En observation i Figur 1 är att TTW och WTT för diesel (med 5 % FAME) är ungefär lika stora. Det finns knappt någon annan WTW, livscykelanalys (LCA) eller motsvarande typ av studie som kommit fram till liknande resultat. Ett exempel på en studie som läsaren kan referera till är den studie som gemensamt utförts av företrädare för EU (genom laboratoriet JRC), europeisk oljeindustri (CONCAWE) och europeisk fordonsindustri (EUCAR). Denna brukar benämnas JEC-studien och finns i flera versioner, där den senaste utgåvan kom i mars-april

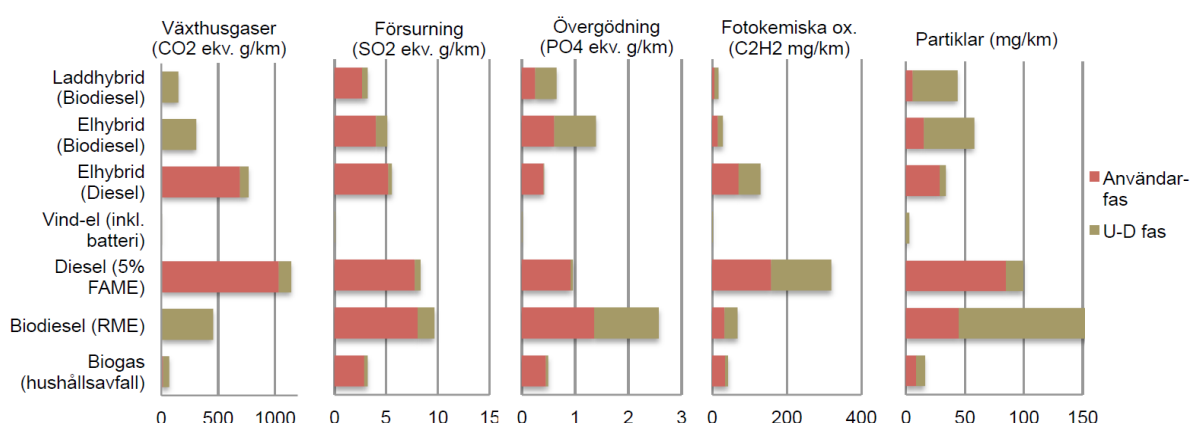


Figur 1. Energianvändning per km (från BTH-rapporten)

2014 [3]. JEC-rapporten omfattar bara personbilar, inte bussar, men skillnaden för TTW och WTT för dieslbilar jämfört med dieselbussar i BTH-rapporten är ändå anmärkningsvärd⁵. Exempelvis utgör WTT knappt 17 % av totalt WTW för en konventionell dieslbil (ej hybrid, alltså) av årgång 2010. Det motsvarar en effektivitet på ca 86 % i WTT fasen⁶. Det är en ganska "normal" siffra i WTW studier. Att ca hälften av energin skulle användas i WTT fasen har inte författarna observerat bland resultaten från någon annan studie. Raffinering av olja är – per definition – en väldigt "raffinerad" process som kännetecknas av hög verkningsgrad, dvs. små förluster. Oftast brukar alternativa drivmedel och biodrivmedel ha en lägre verkningsgrad än drivmedel som framställs från råolja. Det är inte så förvånande i biodrivmedelsfallet eftersom biodrivmedel tillverkas från "jungfrulig" råvara medan naturen så att säga redan delvis "processat" den fossila råvaran.

Man kan också notera att en del andra data i Figur 1, exempelvis biodiesel och hybrider, visar på anmärkningsvärt höga nivåer i WTT fasen medan WTT för biogas får anses låg i den jämförelsen.

I Figur 2 visas avgasemissioner för olika energibärare från BTH-rapporten. Även i detta fall finns en del anmärkningsvärda resultat, varav några kommenteras nedan.



Figur 2. Avgasemissioner per energibärare (från BTH)

När det gäller förurning ligger nivåerna för diesel och biodiesel högt. Det kan knappast handla om SO₂, eftersom dieselolja sedan miljöklass 1 introducerades i början på 90-talet är praktiskt taget svavelfri, utan måste rimligen hänföras till NO_x (omräknat till SO₂-

⁵ Notera att förhållandena mellan energianvändning i WTT, TTW och WTW knappast påverkas alls av val av fordon. Det är ju samma dieselkvalitet och skillnaderna i distribution av dieselolja för personbilar och bussar är marginella (bussar har ofta egna tankningsdepåer medan personbilar oftast tankar vid publika stationer). Siffrorna från JEC studien kan därför också anses relevanta för dieselbussar.

⁶ Energianvändningen i WTT ledet är 33 MJ/100 km, 163 MJ/100 km i TTW ledet och 196 MJ/km för WTW (totalt).

ekvivalenter). Avgaskraven i Euro VI⁷ för NO_x emissioner är ju desamma för alla typer motorer, vilket borde ge liknande nivåer, såvida inte några av alternativen skulle ha NO_x-nivåer som understiger gränsvärdena. Dock är även absolutnivåerna höga i de fall som nämndes.

Vidare är nivåerna av fotokemiska oxidanter höga för diesel, samt partiklar för biodiesel och diesel. Lokal ozonbildning (relevant för hälsoeffekter i tätort) är som regel begränsat av kolväten och flyktiga organiska föreningar (VOC); inte NO_x⁸. Som figuren antyder (C₂H₂) är det är det VOC man utvärderat. Moderna dieselbussar har oxidationskatalysatorer och därmed extremt låga nivåer av HC, och även VOC, vilket också gör att resultaten för fotokemiska oxidanter är förvånande.

När det gäller partiklar är det välbekant att moderna dieselfordon (även bussar!) är försedda med partikelfilter och därmed också borde generera låga partikelemissioner. För dieselbussen redovisas en total nivå av nära 100 mg/km. Gränsvärdet i Euro VI är 10 mg/kWh och även om det används lite mer än 1 kWh/km för en buss ser vi här en faktor nära en tiopotens högre än gränsvärdet. Vidare brukar tester på chassidynamometer ge nivåer väsentligt lägre än 10 mg/km, faktiskt ner mot 1 mg/km och under (resultat inom detta område redovisas i senare kapitel), vilket ger en faktor 100. *En skillnad mot faktiska mätvärden för moderna bussar på uppemot två tiopotenser får anses synnerligen anmärkningsvärt.* Samma kommentarer som ovan gäller även för partikelemissioner i TTW-fasen för hybrider och FAME (RME). När det gäller partikelemissioner i WTT-ledet för FAME är den nivån än mer anmärkningsvärd och totalt sett (WTW) ligger FAME i särklass högst (~150 mg/km). Detta indikerar att partikelnivåerna i odlingsledet (t.ex. från traktorer och arbetsmaskiner) för växtoljor skulle vara enormt höga eftersom omförestring inte är känt för att ge upphov till höga partikelutsläpp och partikelemissionerna från distributionen av FAME torde vara i samma storleksordning som distribution av dieselolja. Det "problem" för FAME som resultaten för partikelemissioner i Figur 2 indikerar borde således rimligen vara kopplade till traktorer och arbetsfordon som används i produktionen av FAME (företrädesvis rapsolja, kan man förmoda).

1.3.2 Analys av bakgrundsdata till BTH-studien

En djupare analys av BTH-studien och andra liknande studier inom området ligger utanför uppdraget. Eftersom det antas att BTH-rapporten är av stor betydelse för beslutsfattare inom svensk kollektivtrafik, samtidigt som en del av resultaten tycks avvika från andra studier eller i övrigt är anmärkningsvärda har författarna ändå gjort en mindre granskning av bakgrundsdata. Författarna vill påpeka att denna granskning inte på långa vägar är fullstän-

⁷ I denna rapport används genomgående beteckningar med romerska siffror för avgaskrav på motorer till tunga fordon och arabiska siffror för avgaskrav till lätta fordon.

⁸ Ozonbildning regionalt styrs mera av NO_x än VOC men det handlar då om lägre koncentrationer som främst torde ha effekter på växande gröda, inte hälsoeffekter på människa.

dig och det kan mycket väl finnas många andra aspekter än de som författarna noterat. Det som lyfts fram här är några exempel.

Avgasemissionerna från fordonen (TTW fasen) utgör en betydande andel av den totala miljöbelastningen och bakgrundsdata är här av stort intresse. När det gäller metodik för att uppskatta bidraget från WTT fasen har en annan metodik använts i föreliggande studie än i BTH-studien, vilket gör att just den jämförelsen är av mindre intresse och den utelämnas därför. Ett undantag görs dock. Det gäller emissioner och traktorer och arbetsfordon inom lantbruket.

BTH rapporter hänvisar bl.a. till underlag för livscykelanalyser från forskare i Lund (Börjesson m.fl. [4]). Författarna har undersökt denna referens samt ett antal andra referenser från författare till den nämnda rapporten som publicerats tidigare och som refereras till. Beskrivningarna av underlaget när det gäller fordon är som regel ytterst knapphändiga, medan WTT fasen behandlas mer ingående. En studie som refereras till i flera fall är en artikel i Biomass & Energy av Börjesson m.fl [5]. Artikelns har genomgått en "peer-review" granskning. Studien är baserad på svenska förhållanden och enligt utsago, "state-of-the-art" teknik. I bilaga A till artikeln redovisas data för emissioner från bl.a. fordon, traktorer och andra arbetsmaskiner. Dessa data har i sin tur hämtats från Blinge m.fl. [6] vad gäller fordon och Hansson m.fl [7] för traktorer och arbetsmaskiner. Emissionerna uttrycks i enheten mg/MJ använt bränsle. Författarna till föreliggande rapport har studerat nämnda referenser [6, 7]. Med hjälp av energianvändning och verkningsgrad kan man räkna fram specifikt vilka data ur respektive rapport som använts. Nämnda rapporter är dock inte den ursprungliga källan till data. Data i rapporten från Blinge m.fl. baseras i sin tur på data från en rapport av Ahlvik m.fl. [8] och Hansson m.fl. refererar till en rapport från SMP [9]. Dessa är de ursprungliga källorna till data för fordon och traktorer/arbetsmaskiner.

Eftersom en av föreliggande rapporters författare (Ahlvik) även var huvudförfattare till den nämnda rapport som ligger till grund för data för tunga (och lätta) fordon är den välbekant. Rapporten färdigställdes under en period som författaren var verksam på MTC (nuvarande AVL) i Jordbro. MTC tillhörde på den tiden Svensk Bilprovning (nuvarande Bilprovningen) och MTC utförde bl.a. emissionsforskning för Naturvårdsverket på uppdragsbasis såväl som för flera andra statliga myndigheter samt industrin. De data som använts av Börjesson m.fl. i flertalet olika studier under en mängd av år, och således även BTH-studien, härrör från fordon med en teknisk nivå från mitten av 1990-talet, dvs. Euro II. Under en period av ca 20 år har emellertid mycket hänt och dessa data är inte längre representativa för moderna fordon. I MTC-rapporten fanns även uppskattningar för "framtida" teknik, dvs. 2000 (Euro III) och 2005 (Euro IV). Detta gjordes vid en tidpunkt då emissionskraven för Euro III och IV ännu inte var kända men med dagens facit låg uppskattningarna ganska nära de nivåer som sedermera kom att införas i avgaskraven. En i författarnas mening "bättre" studie på området äldre fordon är en rapport av Ahlvik och Brandberg som publicerats via SAE [10]. I denna studie vinn-

lade sig författarna om att göra en teknikneutral jämförelse av olika drivmedel och olika avgasreningsteknik. Detta innebär t.ex. att jämförelse görs mellan drivmedel där – åtminstone ungefärligen – liknande avgasreningsteknik används. Ett konkret exempel är t.ex. att man inte jämför bränsle X utan katalysator med bränsle Y där katalysator används. Man bör i klartext inte jämföra äpplen och päron. Sammanställningen baserades på emissionsmätningar som utfördes på bussar av MTC under 1990-talet. Studien utvärderade också relativa skillnader mellan drivmedel/reningsteknik vad gäller såväl reglerade emissioner, en mängd olika icke-reglerade emissioner, samt flera hälsoeffekter. Tyvärr är även denna studie för ”gammal” för att vara användbar för det som föreliggande studie syftade till att undersöka, nämligen nya bussar. Här finns också en del förklaringen till de resultat från BTH-rapporten som diskuterades ovan. Som nämns på flera andra ställen i föreliggande rapport finns i dag inte motsvarande experimentella underlag för moderna bussar som det som utvärderades av Ahlvik och Brandberg [10]. Detta problem ledde fram till den metodik som använts i föreliggande studie.

När det gäller studierna från Hansson m.fl. [7] och SMP [9] kan nämnas att metodiken där var att använda loggningar av belastningskollektiv för en traktor av fabrikat Valmet 805 samt mätdata för emissioner från en traktormotor av fabrikat Valmet 420 DS, som bl.a. används i Valmet 6400-serien av traktorer. Med detta som underlag kunde emissionsdata för olika typer av arbeten i jordbruket genereras för en Valmet 805 traktor. Förfarandet är naturligtvis inte lika ”exakt” som direkta tester på föreliggande traktor men resultaten kan ändå anses representativa för den tekniknivå som nämnda traktor representerar. En sökning på Internet ger vid handen att traktormodellen Valmet 805 producerades mellan 1982 och 1991 [11]. Motsvarande sökning om modellen 6400 hos samma källa på Internet visar att den började produceras 1991 (slut anges ej i referensen). De första avgaskraven för motorer till arbetsfordon och arbetsmaskiner i EU (Steg I) infördes i januari 1999. Därför kan man inte på ett enkelt sätt avgöra om just de två testade traktormodellerna är representativa för teknik från den tiden. Dock kan man väl utgå ifrån att syftet i studierna från SLU och SMP varit just detta. Traktorer av märket Valmet/Valtra (det senare märket gäller i dag) har i alla fall haft en stor andel av den svenska marknaden. I jämförelse med emissionsnivåer som kan åstadkommas med moderna motorer är dock de nivåer som Hansson m.fl. listar, och som används i BTH-rapporten, avsevärt högre. Här ligger säkert en av förklaringarna till de höga nivåer i WTT ledet som noterades ovan för en del drivmedel i BTH-rapporten.

2 UPPDRAGET

Ecotrafic har av Trafikverket fått i uppdrag att ta fram ett kunskapsdokument om stadsbussar i Sverige. Detta kunskapsdokument ska fungera som en underlagsrapport till ett kortfattat PM, vilket i sin tur ska kunna användas som ett hjälpmedel och stöd vid upphandling av stadsbussar. Fokus på arbetet ska läggas på 2-axliga stadsbussar av Euro VI-klass.

Uppdraget ska omfatta följande delar:

- Beskrivning av stadsbussskollektivet i Sverige
- Teknikbeskrivning
- Bränslen inklusive el
- Emissioner och bränsleförbrukning
- Livscykeldata från Energimyndigheten för bränslen
- Ekonomi (inkl. samhällsekonomi enl. ASEK)
- Enkätundersökning
- Framtiden efter Euro VI

Följande delar ingår inte i uppdraget:

- Bussar som konverteras och inte typgodkänts efter ändringen
- Etiska och samhällsekonomiska diskussioner
- Strategisk livscykelanalys
- Emissioner och effekter vid produktion och distribution av bränslena, exempelvis ozon, försurning och övergödning
- Livscykelstudier för de olika bränslena (inklusive el).

3 STADSBUSSTRAFIK I SVERIGE

I detta kapitel beskrivs kortfattat hur Sverige stadsbussflotta ser ut. Data har hämtats från bland annat vägtrafikregistret (VTR) [12], Statistiska Centralbyrån (SCB) [14], Trafikanalys [14], och från Sveriges Bussföretag [13]. I detta kapitel ges en övergripande och relativt kortfattad beskrivning av stadsbussar i Sverige. För att få en mer detaljerad bild hänvisas läsaren till en rapport från Sveriges Bussföretag, "Statistik om bussbranschen, augusti 2014".

Cirka 6 % av persontransportarbetet sker i Sverige med buss (Tabell 1). Transportarbetet i Sverige domineras stort av personbilstransporter och dessa transporter står för drygt 76 % av landets persontransporter. Drygt 50 % av resorna inom kollektivtrafiken sker med buss. För att bryta beroendet av personbilar så skulle det krävas en enorm stor utbyggnad av kollektivtrafiken. Exempelvis så skulle en fördubblad mängd bussresenärer leda till att personbilstransporterna skulle minska från drygt 76 till ca 70 procent. Lokalt kan förstås den relativa potentialen vara större.

Tabell 1. Fördelning av persontransportarbetet i Sverige 2014

Kategori	Andel (%)
Personbil	76,5
Järnväg	8,4
Buss	6,2
Gång, cykel och moped	3,5
Luftfart	2,4
Tunnelbana	1,3
Motorcykel	0,7
Färjor	0,6
Spårväg	0,4
Summa	100

Persontransportarbete är ett mått av den sammanlagda reslängden. Personkilometer är den sammanlagda reslängden och räknas fram genom att multiplicera antalet resor med medelreslängden. Det bör noteras att definitionen av personkilometer inte är helt strikt. Exempelvis torde syftet för den som reser vara att ta sig från A till B. Det låter sig ofta göras via kortast möjliga väg med personbil, medan en buss exempelvis kan köra en slinga som ger fler personkilometer men likväl ändå bara transporterar personen från A till B. Motsatt fall med fler personkilometer för personbil kan säkert också förekomma, t.ex. om vissa gator eller vägar är avstängda för personbilstrafik men tillåtna för bussar. Andra trafikslag som t.ex. tunnelbana kan ibland ta en kortare väg än trafiken på gator ovanför. Byte mellan olika trafikslag leder ofta till en längre total transportsträcka. Normalt jämförs ändå personkilometer

för olika trafikslag "rakt av", dvs. utan någon korrektion och någon sådan har inte gjorts här heller.

Kostnaden för kollektivtrafiken i Sverige är (2013) drygt 4 000 kr per person och år. Cirka hälften av kollektivtrafikens kostnader är skattefinansierat och den andra halvan kommer från biljettförsäljning. Kostnaden för kollektivtrafiken har under 2000-talet ökat mycket kraftigt. Exempelvis så har bidraget från skattebetalarna ökat med mer än 100 % [13].

3.1 Antal stadsbussar i Sverige

Enligt vägtrafikregistret [12] var i september 2014, i Sverige, drygt 12 000 bussar i trafik. Detta är det totala antalet bussar i landet och som har fler än 8 passagerarsäten och har en totalvikt över 5 ton. Exakt hur många av dessa som är stadsbussar är svårt att bedöma men genom att sortera bort följande:

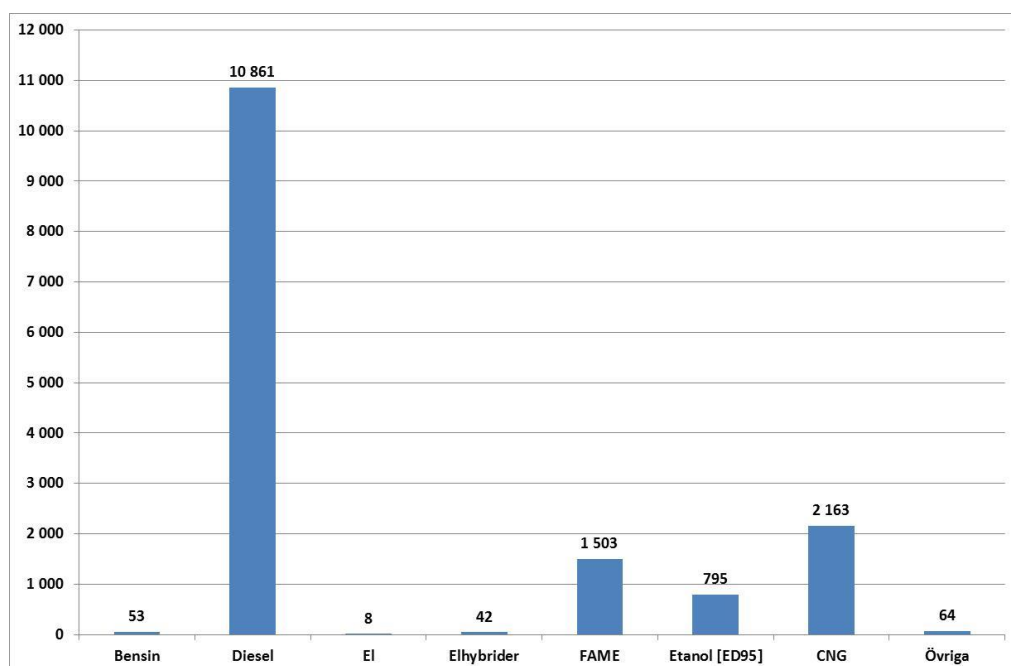
- Bussar som transporterar gods
- Långfärdsbussar
- Bussar för uthyrning och bilskolor

Samt inkludera bussar med karosserikod för låg golvsutförande och som är registrerade för linjetrafik så får man fram att det i Sverige finns cirka 7 000 – 8 000 stadsbussar.

3.2 Bussar uppdelat på ålder och Euroklass

Sveriges yngsta fordon är bussar. Medianåldern för en buss är cirka 4 år. Som jämförelse så är medianåldern på en personbil 9 år och en lastbil 7 år.

3.3 Bussar uppdelat på bränsle



Figur 3. Sveriges bussflotta (antal) uppdelat på drivmedel. Källa Trafikanalys [14].

År 2014 var andelen bussar som drevs med förnybara drivmedel inom den av upphandlade kollektivtrafiken 43 procent. Diesel dominerar stort som bussbränsle och de viktigaste biobränslena var år 2013 biogas och FAME.

3.4 Bussar uppdelat på Euroklass

I Tabell 2 listas bussar uppdelat efter motorernas avgastillhörighet för den upphandlade trafiken i augusti 2014.

Tabell 2. Bussar uppdelat på Euro-klass

Euroklass	Andel (%)
VI	4,4
V	69,2
IV	9,5
III	14,8
II	1,7
I	0,1
0	0,1
< 0	0,3
Summa	100

Flest bussar återfanns i gruppen Euro V. Euro VI som blev obligatoriskt för bussar sålda efter 31/12 2013 var drygt 4 % [14]. Inom de närmaste åren kommer självfallet andelen för Euro VI bussarna att öka markant, helt enkelt eftersom det inte tillkommer några nya bussar i de övriga klasserna. De äldre busarna skrotas helt enkelt ut. Fortfarande finns dock en del Euro III bussar i trafik. Det kan säkert i många fall handla om bussar som utgör reserv till nyare bussar och som därför inte har någon lång årlig körsträcka.

3.5 Bussar uppdelat efter fordonsstorlek

I Tabell 3 visas bussarna uppdelade efter fordonsstorlek.

Tabell 3. Bussars storlekar

Buss, typ	Andel (%)
Normalbuss	38,0
Boggiebuss	35,6
Ledbuss	17,7
Minibuss	6,5
2-vångsbuss	1,8
Dubbelledbuss	0,4
Summa	100

Med normalbuss menas här bussar som är 12 meter långa och med boggiebuss bussar som är mellan 12 och 14 meter [14].

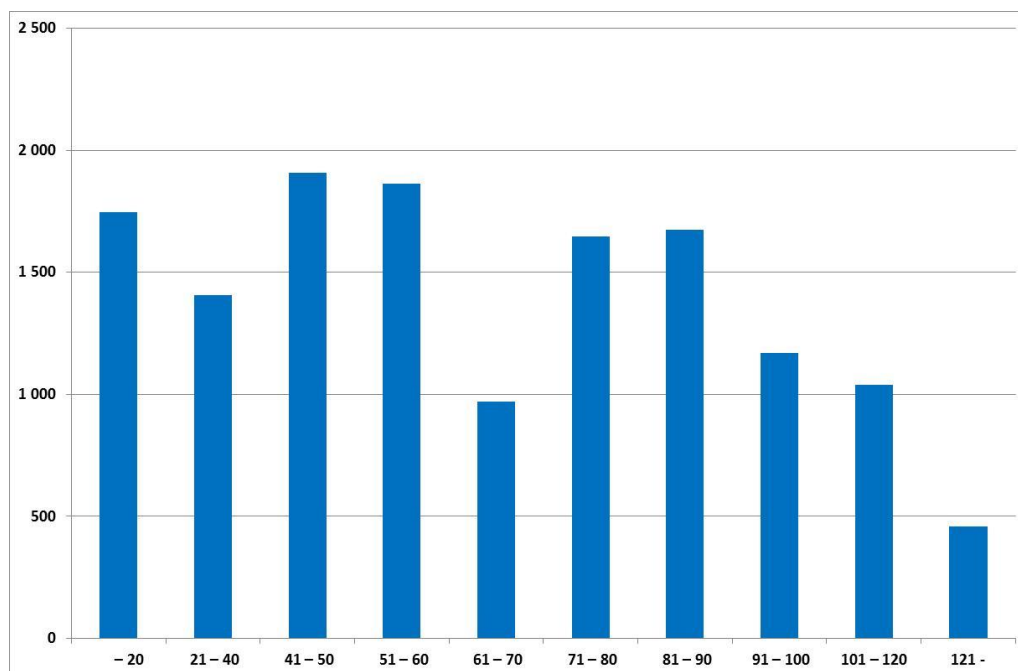
3.6 Bussar uppdelat efter vikt

Tabell 4. Bussars vikt

3,5 - 13,9 ton	17,4
14 - 19,9 ton	33,5
20 - 24,9 ton	35,9
> 25 ton	13,2
Summa	100

3.7 Bussar uppdelat på antalet passagerare

I Figur 4 visas en uppdelning av bussar på antal passagerare.



Figur 4. Sveriges bussflotta uppdelat på antal passagerare (max antal, d.v.s. både sittande och stående) [14].

3.8 Bussar uppdelat på fabrikat

De fyra största bussfabrikaten i Sverige år 2013 listas i Tabell 5. Flest bussar i trafik är av fabrikaten Volvo och Scania men MAN har på senare tid ökat sin marknadsandel.

Tabell 5. Bussfabrikat

Tillverkare	Registreringar 2013	Antal i trafik
MAN	38,3 %	1 701
Volvo	31,4 %	4 103
Scania	26,4 %	2 650
Mercedes	9,0 %	2 236

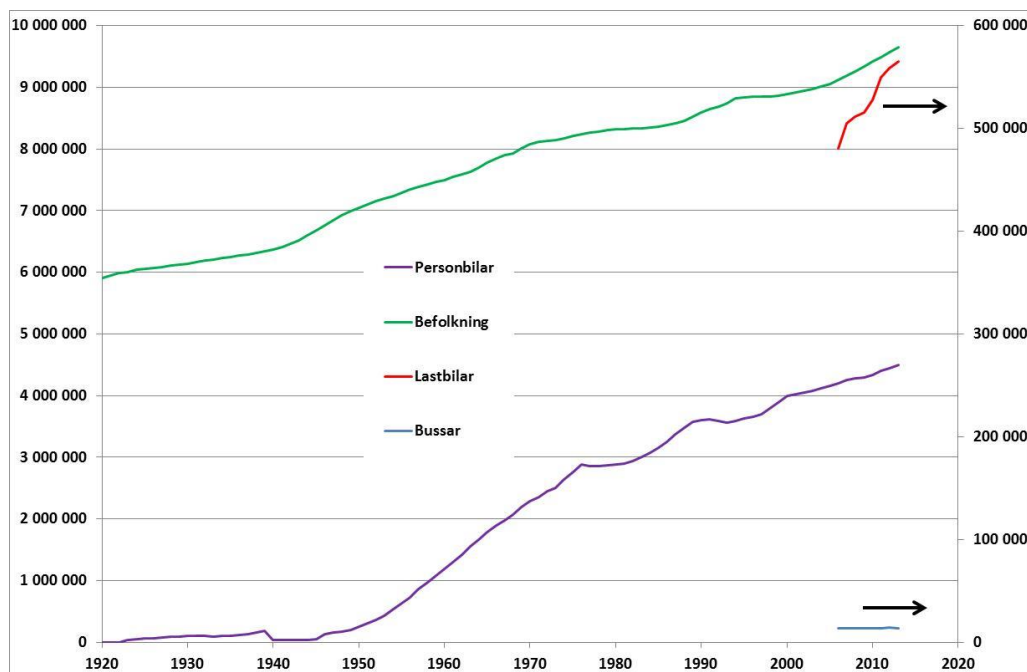
3.9 Bilar, bussar, lastbilar och invånare

Antal personbilar, lastbilar och invånare ökar med tiden medan antal bussar är relativt konstant över tid.

Tabell 6. Förändringar av fordon och befolkning mellan 2006 och 2013

Kategori	Förändring (%)
Personbilar	+ 7 %
Lastbilar	+ 18 %
Bussar	+ 2 %
Befolkning	+ 6 %

Antal personbilar (läs i trafik) följer i stort befolkningstillväxten och antalet bilar per person verkar ha planat ut på ca 0,46 bilar per invånare (Tabell 6 och Figur 5). Sett till befolkningstillväxten så minskar antalet bussar i relativa termer. Enligt ett arbete Ecotraffic utförde år 2013 så bedömdes att det kommer att finnas drygt 5 miljoner personbilar i trafik år 2030 [15].



Figur 5. Antal fordon i trafik över tid

3.10 Körsträckor, passagerarkilometer

Enligt Svenska Bussföretag körde under 2013 i genomsnitt [13]:

- bussar 5 475 mil
- personbilar 1 223 mil
- tunga lastbilar 4 156 mil

Enligt Keolis och MAN (enkätsvar) så är en typisk körsträcka för en 2-axlig stadsbuss ca 6 000 mil per år. Keolis uppger att medelförbrukningen är 4,18 liter diesel per mil.

Läs mer i kapitel 10 (sidan 94) om enkätsvaren.

4 TEKNIKBSKRIVNING

Kapitel 6, där emissioner och bränsleförbrukning för Euro VI bussar sammanställs, är ett av de viktigare kapitlen i denna rapport. Innan dess är det dock viktigt att göra en genomgång av de olika tekniska lösningar som står till buds för tillfället. I detta kapitel ges en översikt av de olika motorer och drivsystem som är aktuella för olika drivmedel.

4.1 Teknikneutralitet

Begreppet "teknikneutralitet" berördes redan i avsnitt 1.3. I korthet innebär det att man inte ska jämföra äpplen och päron. Man kan exempelvis inte jämföra t.ex. avgasemissioner med bränsle A *utan* katalysator med bränsle Y *med* katalysator. Gör man det vet man ju inte ifall resultaten man jämför beror på bränslena eller på katalysatorn. Det är naturligtvis väldigt svårt att åstadkomma en helt "rättvis" jämförelse även om detta självfallet vore både önskvärt och det enda "rätta". Fördelen med de senaste avgaskraven (Euro VI) är emellertid att de är så "tuffa" att tillverkarna i praktiken måste använda nästan all känd teknik för att klara kraven – detta oavsett bränsle. Det ökar förutsättningarna för att jämförelserna blir teknikneutrala.

Det förtjänar också att nämnas att det finns skillnader mellan olika drivmedel som omöjliggör användning av all teknik med alla typer av drivmedel. Exempelvis kan den kända tekniken med trevägskatalysator inte användas på motorer som körs på luftöverskott, exempelvis dieselmotorer eller gasmotorer med mager förbränning (det finns fler exempel). Liknande hinder – eller i alla fall försvårande tekniska problem i en del fall – som funnits tidigare är blyad bensin och för hög svavelhalt i dieselolja och bensin. Kraven på drivmedel är dock i dag så pass hårda att några sådana hinder inte föreligger längre. Det ökar i sig förutsättningarna för en teknikneutral jämförelse.

En specifik teknisk lösning som kan diskuteras i sammanhanget är partikelfilter. Denna teknik är känd sedan länge och används numera på alla dieslbilar och tunga fordon. Tekniken benämns DPF (Diesel Particulate Filter). Den första bensinbilen med motsvarande GPF (Gasoline Particulate Filter) teknik introducerades hösten 2014 [16]. Detta används redan som argument för att förespråka tekniken av branschorganisationer som representerar tillverkare av avgasreningsutrustning [17]. Någon av författarna känd applikation av partikelfilter på metangasdrivna fordon finns inte. Tekniken har dock undersökts på en etanoldriven bussmotor i ett projekt som en av föreliggande rapporters författare varit med om att initiera samt medverkat i [18]. Det partikelfilter som undersöktes i nämnda rapport var optimerat för dieseldrift. I vår uppskattning av partikelnivån för en etanoldriven dieselmotor utgår vi dock ifrån ett (tänkt) partikelfilter som är optimerat för etanoldrift. Detta är naturligtvis baserat på en uppskattning av potentialen för tekniken men bortsett från det kan man konstatera att kravet på teknikneutralitet är uppfyllt i det fallet genom att partikelfilter förutsätts.

4.2 Energiomvandlare

Energiomvandlare är per definition en anordning som omvandlar en form av energi till en annan. Begreppet är ganska vitt men diskussionen här begränsas till de alternativ som är av störst intresse för studien, dvs. sådant som redan är kommersiellt tillgängligt eller förväntas kunna bli det inom överskådlig framtid. Ett exempel på en energiomvandlare är en förbränningsmotor som omvandlar kemisk energi i bränslet till mekaniskt arbete. Några typer av energiomvandlare av intresse i denna studie är:

- ottomotorer
- dieselmotorer
- elmotorer

Generellt kan man börja med att konstatera att all omvandling av energi är förknippad med förluster. Energin kan inte förstöras men den kan förloras på sätt som gör att den inte är användbar. Ett känt exempel är värmeförluster, som ibland t.o.m. är nödvändiga för att säkerställa hållbarheten för motorkomponenter. Det finns i flera fall naturlagar som begränsar den maximala effektiviteten för en energiomvandlare. Exempelvis är den lägsta formen av energi värme; ett tillstånd som all energi strävar mot. Att omvandla värmeenergi till nyttigt arbete är en av de allra svåraste omvandlingarna och kan alltså inte ske med 100 %-ig verkningsgrad. Termodynamiken sätter här gränser även för idealiserade kretsprocesser och för reella processer tillkommer ytterligare förluster.

När ett drivmedel förbränns är det första steget i omvandlingen att den kemiska energin omvandlas till värme och sedan omvandlas värmets till mekaniskt arbete. Ifall den kemiska energin i stället omvandlas direkt till elektrisk energi, t.ex. via en bränslecell, och från el till mekaniskt arbete finns inte termodynamikens begränsningar och verkningsgraden kan teoretiskt bli högre, dock knappast 100 % i det här fallet heller. En annan hypotetisk energiomvandling vore att direkt gå från kemisk energi till mekaniskt arbete. Detta skulle kunna ske i en slags "muskel". I och med att det elektriska mellansteget undviks skulle i teorin en ännu högre verkningsgrad än för bränslecellen kunna åstadkommas. En energiomvandlare av detta slag finns dock inte ännu; ej ens som koncept.

Även om bränslecellen teoretiskt vore en uppenbar "vinnare" när det gäller verkningsgrad kan man inte bara beakta ett enda steg i hela WTW processen. Bränsleceller kan i dag inte använda alla typer av drivmedel, utan begränsas till några få alternativ, varav vätgas är det mest bekanta och det som fungerar bäst i bränsleceller. Vätgas finns emellertid i ytterst begränsad omfattning i jordskorpan som "fossil" resurs, utan måste produceras (omvandlas) från andra resurser. Eftersom alla sådana omvandlingar är behäftade med förluster är det inte uppenbart att bränslecellalternativet får den högsta verkningsgraden i ett systemperspektiv, dvs. för hela WTW kedjan. Bränsleceller i bussar finns dock ännu inte i någon nämnvärd omfattning i produktion och ingår därför inte i denna studie. Flera av de nämnda alter-

nativen diskuteras inte vidare i rapporten utan författarna begränsar sig till de ovan listade alternativen.

4.2.1 Ottomotorn

En ottomotor karakteriseras av ett relativt lågt kompressionsförhållande och en förhållandevis snabb förbränning som sker nära kolvens övre dödpunkt. Det maximala kompressionsförhållandet begränsas av knockning. I den *ideala* ottomotorn sker förbränningen momentant, dvs. omedelbart eller vid konstant volym. Man skulle kunna säga att den är en "explosionsmotor". Den *reella* ottomotorn är allt annat än en explosionsmotor. Benämningen är egentligen helt felaktig för en reell ottomotor. Begreppet explosionsmotor existerar inte annat än som lekmannamässig beteckning. Ottomotorn är en förbränningsmotor. En typisk period för förbränningen i en ottomotor kan exempelvis vara kring 40 grader vevvinkel. Förbränningen kan inte heller ske symmetriskt kring kolvens övre dödpunkt utan tyngdpunkten är förskjuten till efter övre dödpunkten helt enkelt för att undvika knockning (och för att minska värmeförluster). Nämda avsteg från den "ideala" ottomotorn medför naturligtvis att verkningsgraden för den reella ottomotorn är lägre än för den ideala. Noteras kan dock att ottoprocessen för ett visst *givet* kompressionsförhållande (t.ex. 12:1) har högre verkningsgrad än dieselprocessen. Detta diskuteras vidare nedan.

4.2.2 Dieselmotorn

Den ideala dieselprocessen kännetecknas av förbränning vid konstant tryck. Kompressionsförhållandet är mycket högre än i en ottomotor. Typiska värden för en modern dieselmotor till tunga fordon ligger i intervallet från 17:1 till 19:1. Vid ett givet kompressionsförhållande är verkningsgraden i en ottomotor, som nämnts ovan, högre. Kompressionsförhållandet är emellertid inte den tekniska begränsningen. Det är i stället maximala cylindertrycket (i dieselmotorfallet) eller knockning (ottomotorfallet). Vid ett givet cylindertryck ger den både den ideala (och den reella) dieselprocessen en *högre* verkningsgrad än ottoprocessen. Dessutom är dieselmotorer konstruerade för högre tryck än ottomotorer, inte bara p.g.a. det högre kompressionsförhållandet utan också för att de som regel är överladdade med turbo. Moderna bensindrivna ottomotorer är också försedda med turbo om än med lägre laddtryck än i dieselmotorfallet. Kraven på ökat cylindertryck även i ottomotorfallet har medfört att motorstrukturen förstärkts och bensinmotorer liknar mer och mer dieselmotorer i det avseendet. Flera nya bensin- och dieselmotorer använder exempelvis mer eller mindre identiska motorblock av just den anledningen. För tunga ottomotorer finns egentligen inte begränsningen i cylindertryck av *hållfasthetsskäl* för motorstrukturen eftersom de motorerna är derivat av dieselmotorer. Såväl en ideal dieselprocess som en reell har en senare och längre förbränning (typiskt 60 grader vevvinkel) än den i en ottomotor.

Någon energiomvandlare av typen värmemotor med högre verkningsgrad än dieselprocessen där den praktiska begränsningen är cylindertryck (av hållfasthetsskäl) finns egentligen inte. Det finns förvisso andra kretsprocesser där högre verkningsgrad hävdas men de är som

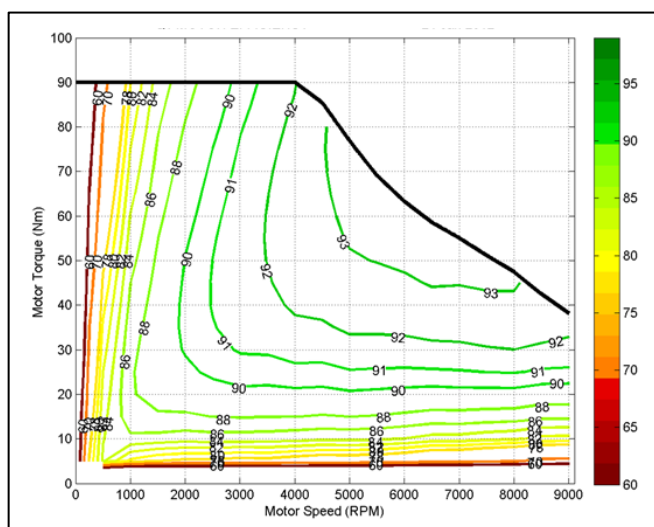
regel endast varianter av dieselprocessen. I det sammanhanget kan nämnas att carnotprocessen, som är "bäst" av alla tänkbara kretsprocesser när det gäller begränsning för maximal temperatur, är en av de allra sämsta kretsprocesser som finns när det gäller begränsningen för maximalt tryck. Därför tillverkas inga carnotmotorer.

Ovannämnda skillnader vad gäller förutsättningar mellan otto- och dieselmotorer medför att verkningsgraden i praktiken alltid är högre för dieselmotorer än för ottomotorer. Den relativa skillnaden mellan t.ex. bensinbilar och dieslbilar har förvisso minskat något de senaste åren men är fortfarande stor. Det finns ju också andra parametrar än bara motorn som påverkar bränsleförbrukningen så skillnaderna mellan fordon kan bli större, eller mindre, än mellan enbart motortyperna.

4.2.3 Elmotorn

El är en betydligt mer "högvärdig" form av energi än värme. Värme är ju den lägsta formen av energi mot vilken all annan energi strävar. Omvandling från el till nyttigt arbete begränsas inte av termodynamiken vad gäller den maximala verkningsgraden. Därför är också verkningsgraden för en elmotor mycket, mycket högre än för förbränningsmotorer, som ju omvandlar energi från den lägsta formen till en högre form.

Ett exempel på verkningsgraden för en elmotor visas i Figur 6. Den maximala verkningsgraden ligger för den här motorn på drygt 93 %. Det är en mycket hög siffra i jämförelse med värmemotorer. Man kan också notera – vilket kanske är ännu viktigare – att verkningsgraden också är mycket hög vid låga laster. Maximala verkningsgraden för en dieselmotor, dvs. den mest effektiva värmemotorn som finns, ligger på ca 45 % (eller möjligen 46 %) i en motorstorlek som används i tunga fordon. Det är bara ca hälften av elmotorns verkningsgrad. Relativt sett är skillnaden större vid låga laster. Vid nollast (tomgång, eller vad man nu vill kalla det för en elmotor) är dock verkningsgraden per definition noll, liksom för andra energiomvandlare som diskuteras här.



Figur 6. Verkningsgrad för elmotor med permanentmagnet (källa: Magna electronics)

Paradoxalt kan man se den höga verkningsgraden för elmotorn som en nackdel i framtiden. Det är nämligen väldigt svårt att ytterligare öka verkningsgraden från en redan mycket hög nivå. Ligger den redan nu nära 100 % är potentialen för ytterligare förbättringar liten. Någon procentenhet till är kanske möjligt i framtiden men mer kan det inte bli. I jämförelse är po-

tentialen till relativa förbättringar däremot mycket större för förbränningsmotorer. Det finns exempelvis forskningsprogram som syftar till att öka verkningsgraden till 55 %, eller t.o.m. 60 % för dieselmotorer. Motsvarande relativa förbättring för en elmotor skulle kräva långt över 100 % i verkningsgrad för elmotorn (exv. $55/45 \cdot 93 = 114$ %), vilket inte är möjligt enligt naturlagarna.

I ett eldrivsystem finns för övrigt också andra förluster än i själva elmotorn. Det är ett komplicerat system med många "diffusa" förluster i en mängd olika komponenter. Som jämförelse kan nämnas att en konventionell växellåda kan ha en medelverkningsgrad i en körcykel över 90 %. Att i ett hybridsystem på liknande sätt gå från förbränningsmotorns vevaxel via generator, inverter till elmotor och hjul ger en avsevärt sämre verkningsgrad än att använda en växellåda. Mellanlagring av energin i batteri, som bl.a. är en förutsättning i en seriehybrid, ger ytterligare förluster. Dock finns vid hybridisering andra fördelar som uppväger den nämnda nackdelen, t.ex. möjligheten att återvinna bromsenergi och att skala ned förbränningsmotorn.

Förbränningsmotorn är en slags kraft/värme anläggning, eftersom den vid behov kan tillföra värme till kupén. För fordon som drivs med enbart el krävs att denna energi tillförs på annat sätt. Andra parametrar som påverkas av kyla bidrar också till att den relativa skillnaden i energianvändning mellan fordon som drivs med el och förbränningsmotor minskar vintertid. Problemet är bekant för elbilar, där räckvidden minskar på ett oproportionerligt sätt jämfört med förbränningsmotordrivna bilar. Rena elfordon, men även hybrider, är ofta tyngre än fordon med konventionella drivsystem. Det gör att färdmotståndet ökar (p.g.a. det ökade rullmotståndet) och att den energi som behövs vid accelerationer blir högre. Dessutom måste drivsystemet skalas upp (p.g.a. den ökade vikten) för att ge samma prestanda som ett konventionellt fordon.

Det som nämnts ovan vad gäller eldrivsystem och hybridsystem är viktigt som bakgrund eftersom det i lekmanamässiga sammanhang ofta hävdas att förbränningsmotorn har en verkningsgrad på t.ex. 10 % (eller 20 %, eller någon annan jämn siffra) medan elmotorn har en verkningsgrad på 90 %, vilket skulle göra att ett elfordon är upp till 10 gånger effektivare än konventionella fordon med förbränningsmotor. Några tillförlitliga data för den jämförelsen har inte författarna hittat och avstår också från beräkningar och spekulationer. Så stor som nämnts i exemplet är dock knappast den relativa skillnaden.

4.3 Energilager

Energi kan lagras på många olika sätt. Fordonets bränsletank är ett sådant men här avses andra energilager, som t.ex. sådana som används i hybridfordon. Vanligast är kemiska batterier men det finns även andra alternativ. Några få av dem diskuteras nedan.

4.3.1 Batterier

På senare tid har litium-jon batterier introducerats och de har högst kapacitet i förhållande till vikt i kombination med en hög effekttäthet bland de batterityper som finns kommersiella i dag. Flera varianter av li-jon batterier är under utveckling och det är rimligt att tro att tekniken kan utvecklas vidare. Det finns dock teoretiska begränsningar som sätter gränser för hur långt man kan nå och dessutom är li-jon batterier i dag mycket dyrare än konventionella blybatterier (vid samma kapacitet i båda fallen). Den största teoretiska potentialen för batterier baserade på litium finns för litium-luft kemin. Detta helt enkelt eftersom luft finns tillgängligt i omgivningen och därmed inte belastar batteriet (och fordonet) med vikten av just luft (ungefär som förbränningsmotorn som inte behöver bära med sig luft motsvarande ca 15 gånger vikten av bränsle). Någon säker prognos om huruvida (och när?) de tekniska problemen med denna typ av batterier någonsin går att lösa finns inte. För lång tid framöver får man nog räkna med att li-jon batterier kommer att vara de bästa som finns att tillgå.

Någon lättare metall än litium som är fast vid rumstemperatur och tryck finns inte. Litium finns inte heller i vare sig hög koncentration eller i speciellt stor mängd i jordskorpan, vilket gör det dyrt att utvinna. Det behövs också andra grundämnen i dagens li-jon batterier som också är sällsynta och dyra. Även om man således kan förvänta sig en viss utveckling av batterier baserade på litium kommer batterier för såväl elhybriddrift som ren eldrift att utgöra en betydande del av fordonets vikt, volym och kostnad inom överskådlig framtid. Detta kommer således även framgent att förbli problem som förknippas med såväl elhybrider som rena elfordon.

4.3.2 Superkondensatorer

Superkondensatorer är ett alternativ till kemiska batterier för hybrider. Fördelen är den höga effekttätheten medan energitätheten dock är betydligt lägre än för kemiska batterier. Superkondensatorer kan med fördel kombineras med kemiska batterier, där de senare då kan optimeras mot en högre energitäthet snarare än effekttäthet. Utvecklingen av superkondensatorer har ännu inte hunnit lika långt som för kemiska batterier men det finns dock redan i dag hybridbussar i produktion som använder superkondensatorer. Superkondensatorer är inte begränsade till lika sällsynta grundämnen som kemiska batterier och har därför potential till lägre kostnader i framtiden.

4.3.3 Svänghjulslager

Lagring av energi i svänghjul ger en mycket hög effekttäthet men lägre energitäthet än kemiska batterier. Lagringen sker i form av kinetisk energi. Överföringen kan ske antingen mekaniskt eller elektriskt. Eftersom bromsenergin som tillvaratas också är i form av kinetisk energi finns för svänghjulslager en mycket stor potential till hög verkningsgrad om överföringen är mekanisk (ingen energiomvandling krävs då). Detta naturligtvis under förutsättning att mekanisk kraftöverföring samt den steglöst variabla utväxling som krävs kan åstadkommas med hög verkningsgrad (se vidare resonemang nedan). Svänghjul använder inga säll-

synta grundämnen, så potentialen till låga kostnader är mycket större än för kemiska batterier. Förvisso används kolfiber men priserna för kolfiber är i sammanhanget låga och tämligen liten mängd behövs. Exempelvis kan en vikt för ett svänghjul på 6 kg räcka för hybridisering av drivsystemet till personbilar (se diskussion om alternativa hybridsystem nedan). Ett större lager krävs kanske för att nå den fulla potentialen för en personbil (och förstås ytterligare större till en buss) men även på den nämnda nivån kan förvånansvärt stora förbättringar nås.

4.3.4 Tryckluftslager

En lagring i form av tryckluft, eller i form av kvävgas, kan ske för hydrauliska och pneumatiska hybrider i trycklufttankar. Effekttätheten är mycket hög men energitätheten är även i det här fallet lägre än för kemiska batterier. Liksom för svänghjulslager finns potential till mycket hög verkningsgrad i lagringen (se diskussion om alternativa hybridsystem nedan). Tryckluftslager använder inga sällsynta grundämnen och kan av den anledningen ge väsentligt lägre kostnader än kemiska batterier.

4.4 Kombinationer av drivmedel, energiomvandlare och drivsystem

I det här avsnittet görs en översikt av några detaljer som rör de olika drivmedel, energiomvandlare som är av intresse i sammanhanget. Mest fokus ligger i det här kapitlet på energieffektivitet eftersom i huvudsak experimentella data från certifieringar använts för att uppskatta emissionsnivåerna, vilket behandlas i kapitel 6.

4.4.1 Konventionella dieselbussar

Konventionella dieselbussar utgör referensen med vilken alla andra kombinationer av drivmedel och energiomvandlare/drivsystem jämförs med. Därmed är den busstypen också allra viktigast när det gäller att få fram rätt underlag.

En årlig översikt av teknikläget vad gäller effektivitet och avgasemissioner brukar varje år publiceras av SAE i en genomgång av Johnson, verksam på företaget Corning, en tillverkare av bl.a. monoliter till katalysatorer och partikelfilter. Den senaste genomgången av teknikläget publicerades på SAE kongressen i april 2014 [19]. Resonemanget nedan baseras till stor del på resultat från den studien, även om det inte kommenteras direkt i texten. I några fall diskuteras också de bakomliggande studierna som använts av Johnson.

Johnson diskuterar bränsleförbrukning och effektivitet grundligt. Amerikanska energidepartementet (DOE) ger stöd till motortillverkarna för att utveckla prototypmotorer som kan nå en verkningsgrad på upp till 50 % i första steget och 55 % till 2020. I maj 2013 hade konceptmotorer nått de nivåer som visas i Tabell 7.

Tabell 7. Summering av resultat i DOE:s forskningsprogram

Motortillverkare	Eff (%)
Cummins	51,1 %
Daimler	48,1 %
Volvo	48,0 %
Navistar	48,2 %

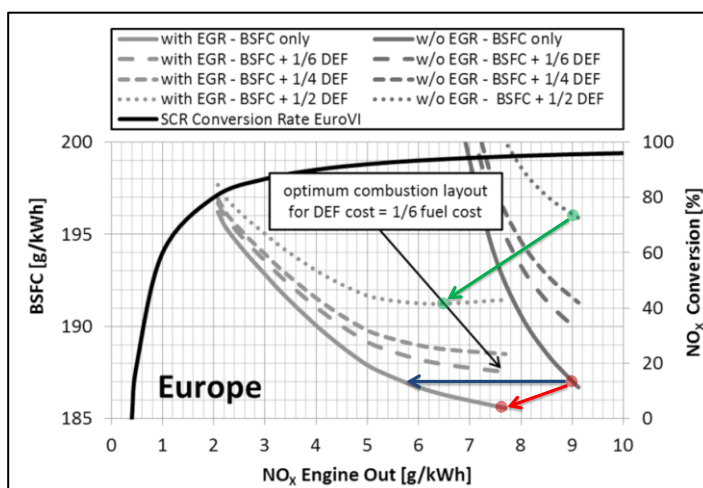
Som jämförelse kan denna rapports författare nämna att verkningsgraden för en state-of-the-art motor till tunga fordon i dag ligger kring 45-46 %. Tabellen ska inte ses som någon form av jämförande "ranking" mellan motortillverkarna, eftersom de ibland använder olika koncept, där man i en del fall forskningsmässigt inte nått lika långt

som de med "bäst" resultat men där potentialen trots det kan vara minst lika stor genom framtida utveckling.

Johnson diskuterar också framtida förbränningskoncept som kan minska både emissioner och bränsleförbrukning men för Euro VI och motsvarande amerikanska EPA 2010 krav räcker dagens teknik tillsammans med efterbehandling gott och väl, och rapporten ägnar en stor del åt just efterbehandlingen. Framsteg görs ständigt t.ex. för partikelfilter och SCR rening och fler av de förbättringarna tycks vara nära kommersialisering. Det går alltså att extrapolera en del av dagens forskningsresultat för att få potentialen till nästa steg i avgaskrav (som förmodligen kommer att kallas Euro VII, enligt tidigare nomenklatur), samt ytterligare effektiviseringar.

Genom att motorer för Euro VI ännu är tämligen nya finns inte så mycket publicerade mätdata att tillgå. En viktig aspekt är ifall de hårdare emissionskraven i Euro VI leder till ökad bränsleförbrukning i förhållande till Euro V. I en studie av Nylund och Koponen, som kommer att kommenteras mer i detalj nedan; spekuleras i att förbrukningen skulle kunna öka så mycket som 10 % mellan Euro V och VI [20].

En liten vägledning kring vad Euro VI kan innebära bränsleförbrukningsmässigt jämfört med Euro V får man från en studie av Theissl m.fl. [21]. Syftet med studien var en optimering av EGR och SCR för att minimera bränsleförbrukningen. Ett diagram från studien visas i Figur 7, där även en bearbetning av diagrammet lagts till av Ecotrafic. Kurvorna där kostnaden för urea (benämnt DEF i figuren) är hälften av dieselpriiset är relevant för dagens kostnadssituation i Europa (och Sverige).

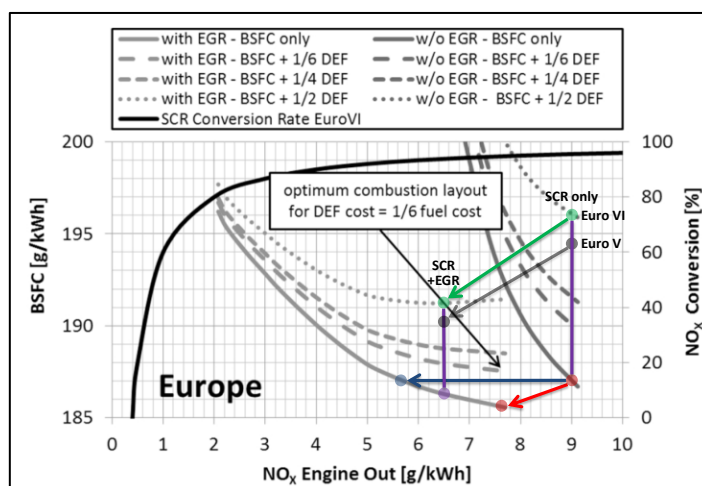


Figur 7. Kostnad för bränsle och urea med SCR och med och utan EGR (från [21], bearbetat av Ecotrafic)

En motor med enbart SCR har en typisk NO_x nivå på 9 g/kWh före katalysatorn. En liten mängd EGR sänker bränsleförbrukningen något (röda pilen) medan samma förbrukning nås vid en NO_x nivå på knappt 6 g/kWh. Summerar man kostnaden för urea och dieselbränsle ligger den optimala nivån kring 6-7 g/kWh men kurvan är relativt flack inom ett rätt så stort område. Den svarta kurvan anger vilken konverteringsgrad SCR katalysatorn måste ha för att klara Euro VI. Det är uppenbart att redan för Euro V skulle det löna sig att använda EGR. Att alla tillverkare inte gjort det har förstås att göra med ökad komplexitet och tillkommande kostnad för själva EGR-systemet.

För att uppskatta potentialen att klara Euro V respektive VI och vilken inverkan på bränsleförbrukningen det kan medföra har ytterligare beräkningar av NO_x och bränsleförbrukning gjorts. Detta illustreras med ytterligare några linjer i Figur 8.

Som framgår av Figur 8 krävs (självfallet) mer urea för att klara Euro VI än Euro V, med alla andra förutsättningar lika. Skillnaden är dock inte så stor. I exemplet med samma nivå av NO_x från motorn med EGR (6,5 g/kWh) är bränsleförbrukningen förstås identisk. Jämfört med den "optimala" (röda) punkten för Euro V skulle en Euro VI motor (lila punkt) få en förbrukningsökning på 0,7 g/kWh, eller 0,4 % som relativ skillnad. Uttryckt som kostnad blir förstås skillnaden större men den är fortfarande marginell. Skillnaden är här 0,9 g/kWh, ifall man jämför grön, respektive lila punkt, för SCR+EGR. I en tänkt jämförelse mellan en Euro V motor utan EGR och en Euro VI motor med EGR är den sistnämnda som konstaterats tidigare avsevärt bättre.



Figur 8. Potential för Euro V och VI

Något man bör beakta är att tekniken på andra områden än SCR hela tiden förbättras. Det gäller t.ex. EGR-system, insprutning, överladdning mm. Exempelvis har insprutningstrycket kunnat ökas flera hundra bar sedan Euro V och ligger nu kring ca 2 500 bar för state-of-the-art Euro VI motorer. Inom kort höjs den nivån till 2 700 bar och 3 000 bar ligger inte långt borta [22]. Nämnade förbättringar gör att förhållandet mellan NO_x och bränsleförbrukning förbättras vid användning av EGR. Sammanfattningsvis finns goda skäl att tro att det som flera motortillverkare hävdar, nämligen att bränsleförbrukningen, samt den totala kostnaden för bränsle och urea, faktiskt kan vara något lägre för Euro VI motorer i jämförelse med Euro V motorer. Kostnaden för EGR-systemet samt merkostnaden för ett mer sofistikerat insprutningssystem måste förstås vägas mot bränslebesparingen och ett minskat behov av urea.

I beräkningsexemplet ovan hamnade ureaförbrukningen på 5 % av bränsleförbrukningen. Denna siffra har använts genomgående i alla beräkningar senare i studien. Det finns motorer som klarar Euro VI helt utan EGR men då sannolikt med en något högre ureaförbrukning än i fallet ovan. På samma sätt kan man också tänka sig mer EGR och lägre ureaförbrukning. När det gäller omsättning i katalysatorn krävs förstås en högre omsättning med enbart SCR än med SCR+EGR. Att tillverkarna trots det klarar Euro VI med enbart SCR visar att det finns en utvecklingspotential till lägre NO_x emissioner i framtiden. Att gå mot "nollemission" av NO_x skulle, kanske lite paradoxalt, inte kräva speciellt mycket högre ureaförbrukning än dagens motorer. Att gå från t.ex. 9 g/kWh till 0,46 g/kWh är ju i absoluta tal den stora reduktionen. Att gå från 0,46 till 0 g/kWh kräver inte mycket mer urea. Sänker man NO_x ut från motorn med EGR skulle det kunna bli väsentligt lägre ureaförbrukning än många motorer i dag.

Några belägg för en så stor ökning av bränsleförbrukningen som 10 % när man går från Euro V till Euro VI kan ovanstående referens och författarnas egna beräkningar inte ge. Tumregelmässigt brukar man säga att den årliga sänkningen bränsleförbrukningen har varit ca 0,5 % genom tekniska förbättringar av motorn. Detta gällde dock bara fram till för ett par decennier sedan medan den dock stått praktiskt taget stilla sedan dess p.g.a. de allt hårdare avgaskraven. En så stor ökning som 10 % skulle alltså motsvara 20 års utveckling enligt den gamla tumregeln. Indikationerna i de referenser som citerats ovan, samt författarnas egna överväganden, är snarare att bränsleförbrukningen åter kommer att börja sjunka i framtiden. Kanske kan inte lika stor relativ årlig förbättring som tidigare nås, och förutsättningarna kommer säkert också att påverkas av andra krav, som t.ex. avgasemissioner men sannolikheten för minskad effektivitet är nog inte så stor.

4.4.2 Biodiesalbussar

Allt ovan om bränsleförbrukning, NO_x mm gäller generellt också för biodiesel, HVO och andra liknande dieselbränslen. I och med Euro VI måste motorer som körs på 100 % FAME (B100) emissionscertifieras och emissionsnivåerna blir då, per definition, snarlika de för dieselolja. Några faktorer specifika för FAME bör dock beaktas.

Det är sedan tidigare allmänt känt att FAME ökar NO_x emissionerna medan en del andra reglerade emissionskomponenter kan minska. Ökningar med ca 10 % är inte ovanliga enligt litteraturen. Sannolikt har denna skillnad minskat i och med moderna flexibla insprutningssystem som kan kompensera för en del av de annorlunda fysikaliska egenskaperna hos FAME jämfört med dieselolja och det de leder till (t.ex. tidigareläggning av insprutningstidpunkten). Fullt ut torde inte detta kunna kompenseras, varför motortillverkarna sannolikt måste ta till en del andra åtgärder för att nå samma NO_x som med dieselolja som bränsle. Det kan t.ex. vara ökad mängd EGR (för motorer som har det) eller en något ökad mängd urea. FAME bildar något mindre sot än dieselolja, vilket i sig borde ge ökad tolerans för EGR.

FAME bildar, som nämnts ovan, något mindre sot, vilket ger minskad belastning på partikelfiltret och mindre frekvent aktiv regenerering. Vidare startar regenereringen med FAME vid

något lägre temperatur än med dieselolja. Dock finns aspekter som t.ex. att sen insprutning i cylindern för att öka avgastemperaturen och därmed starta en aktiv regenerering kan ge mer utspädning av motorsmörjolan. Det här är t.ex. en orsak till att få (om ens någon?) modern dieselpersonbil kan köras på B100. Detta problem kan undvikas genom att använda en extra spridare som sprutar in bränsle direkt i avgasröret, och alltså inte i cylindern, vid regenerering.

FAME kan orsaka andra problem än de som nämnts ovan. Ett sådant problem kan t.ex. vara att FAME innehåller ämnen som är "gifter" för katalysatorer, dvs. påverkar deras livslängd och omsättning negativt i förhållande till dieselbränsle. Problem har också uppmärksammats vid användning av FAME, såväl i "ren" form som inblandat, vid kallt klimat. Som säkert är allmänt bekant måste en hel del material i bränslesystemet bytas ut för att det ska vara kompatibelt med FAME. Detta gäller inte nödvändigtvis enbart B100 utan även vid lägre inblandningar. Anpassningar för att klara av de problem som nämnts kommenteras inte vidare här.

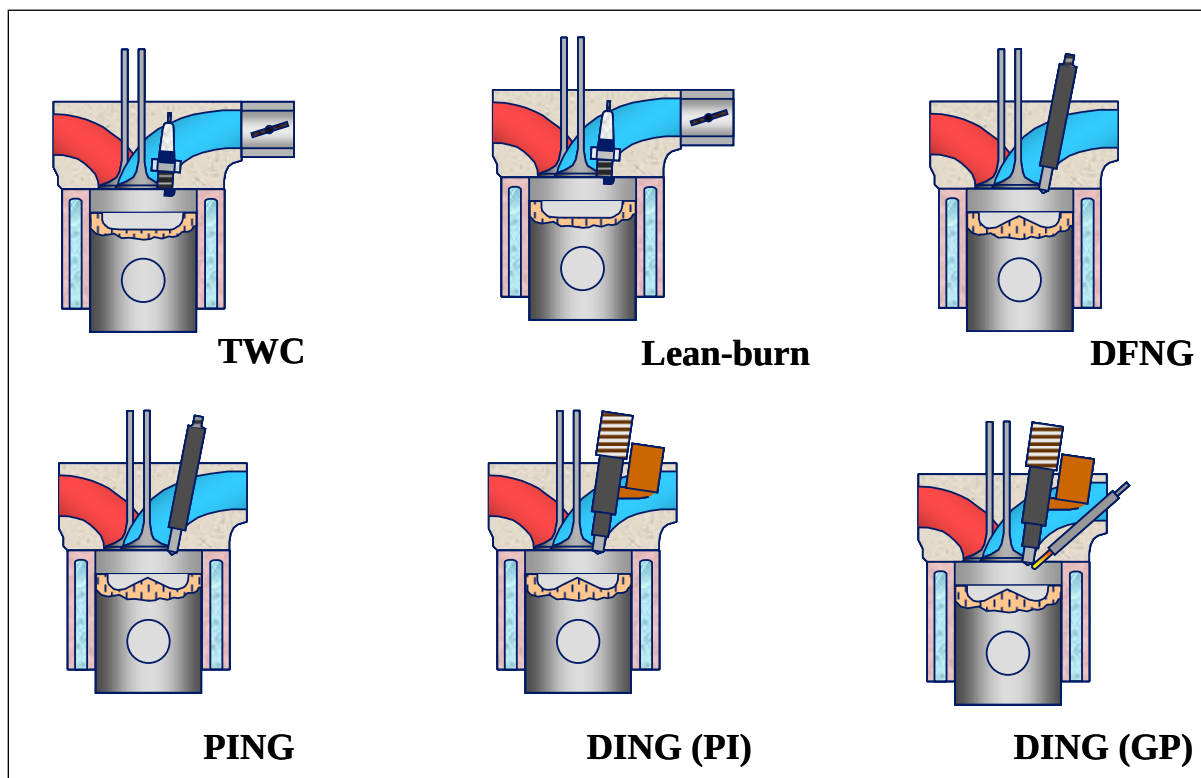
4.4.3 Biogasbussar

Det finns två principiellt olika sätt att använda biogas (och naturgas, fordonsgas, mm.) i motorer till tunga fordon. Den ena varianten använder ottoprocessen och den andra är en dieselprocessen. I Figur 9 visas schematiskt olika typer av förbränningssystem för gasdrivna motorer till tunga fordon. Dessa finns mer noggrant systematiserade och beskrivna i en rapport av Ahlvik som finns publicerad hos Ecotrafic [23].

Någon detaljerad genomgång görs inte här utan det som kan nämnas är att de två system som använder ottoprocessen är baserade på stökiometrisk förbränning eller luftöverskott (lean-burn). Varianter som använder båda förekommer (t.ex. byte mellan de två moderna). De koncept som använder dieselprocessen har inte tändstift för tändning utan antingen dieselbränsle eller glödstift. I Figur 9 visas några varianter på sådana system. Kortfattat kan koncepten sammanfattas enligt:

- TWC: Stökiometrisk förbränning ($\lambda=1$) med trevägskatalysator
- Lean-burn mager förbränning ($\lambda>1$) med oxidationskatalysator
- DFNG, PING och DING (PI) är olika varianter där dieselbränsle används för antändning av gasen. DFNG (Dual-Fuel Natural Gas) är en tvåbränslemotor som även kan köras på 100 % dieselbränsle medan PING (Pilot Injection Natural Gas) är dedikerad (optimerad) för gas genom att endast en liten kvantitet (pilot) diesel kan användas. DING (PI) (Direct Injection Natural Gas) använder direkt insprutning (inblåsning) av gas i cylindern och diesel för tändning via en kombinerad insprutare.
- DING (GP) är snarlik DING (PI), dvs. med direktinsprutning av gas men där tändningen sker med ett glödstift. Detta koncept kan (liksom TWC och Lean-Burn) köras på 100 % gas, till skillnad mot de koncept som använder dieselbränsle för tändning.

För mer detaljer kring de olika alternativen för gasmotorer hänvisas till den nämnda rapporten [23].



Figur 9. Olika koncept för användning av metan i tunga fordon (från Ahlvik [23])

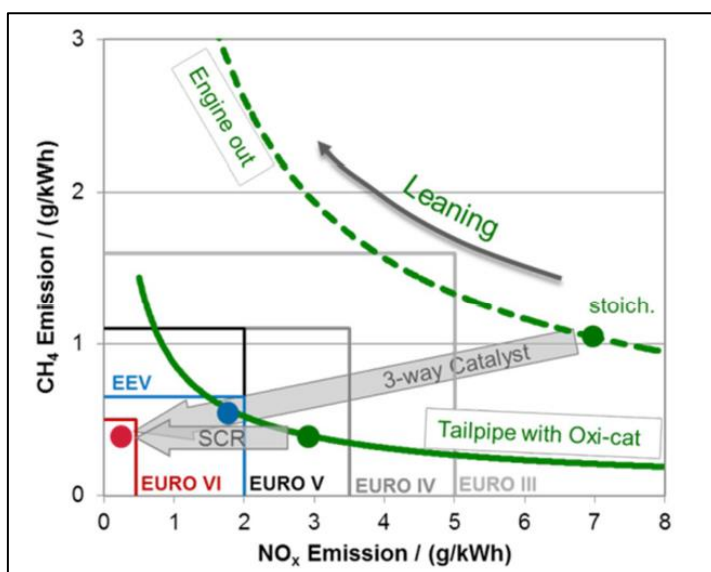
När gasdrivna bussar på allvar började introduceras i början av 90-talet använde de flesta motorer mager förbränning ($\lambda > 1$). En orsak var att det gav mindre termisk belastning på motorn men den främsta orsaken torde ha varit den lägre bränsleförbrukningen i förhållande till stökiometrisk förbränning ($\lambda = 1$). Under de år som gått sedan dess har stökiometrisk förbränning rönt allt större intresse, främst av emissionsskäl. Initialt användes stökiometrisk förbränning i princip bara vid snabba transienter, senare inom ett större område i för varvtal och belastning. I och med Euro VI har dock stökiometrisk förbränning helt tagit över. Det kan vara skäl att diskutera detta lite mer i detalj.

Gasmotorer med mager förbränning klarar inte emissionskraven för NO_x i Euro VI. Man skulle kunna tänka sig att använda SCR på samma sätt som för dieselmotorer. Diagramet i Figur 10 från en studie av FEV och RWTH (Heuser m.fl.) illustrerar problematiken för NO_x och metanemissioner [24].

I Figur 10 ser man att metanemissionerna ökar när motorn körs magrare och magrare (streckad grön kurva). Det är dock helt omöjligt att nå under 0,46 g/kWh med enbart mager förbränning. Detsamma gäller metan med oxidationskatalysator. Däremot finns möjlighet att nå Euro VI med trevägskatalysator. Med SCR finns teoretiska möjligheter att nå Euro VI men

det skulle förmodligen krävas ett helt "batteri" av andra åtgärder förutom SCR. Ifall syftet dessutom är att minimera bränsleförbrukningen krävs dessutom en mängd annan teknik. En del av de tekniska lösningar som kan komma till användning kan bl.a. vara:

- Mager förbränning, respektive stökiometrisk förbränning vid viss förhållanden (byte mellan dessa moder)
- Kyld extern EGR som styrs även med hänsyn till mager förbränning (det går inte att ha väldigt hög EGR och mager förbränning samtidigt)
- Miller system för att sänka temperaturen, ev. kombinerat med tvåstegsöverladdning för att nå acceptabla nivåer för specifik effekt och specifikt vridmoment.
- Oxidationskatalysator som är effektiv för metanoxidation
- Trevägs-katalysator
- SCR katalysator som också måste kunna tolerera höga temperaturer vid stökiometrisk förbränning
- Ammoniak slip katalysator
- Eventuellt partikelfilter



Figur 10. NO_x och metanemissioner med olika tekniker för gasmotorer (källa: FEV/RWTH)

Det behövs knappast något längre resonemang för att dra slutsatsen att de lösningar som listats ovan vore mycket tekniskt komplicerade och dyra. Dessutom är några av dem svåra att kombinera (t.ex. de olika katalysatorteknikerna). I dagens läge är alltså trevägskatalysatortekniken den som tillverkarna föredrar.

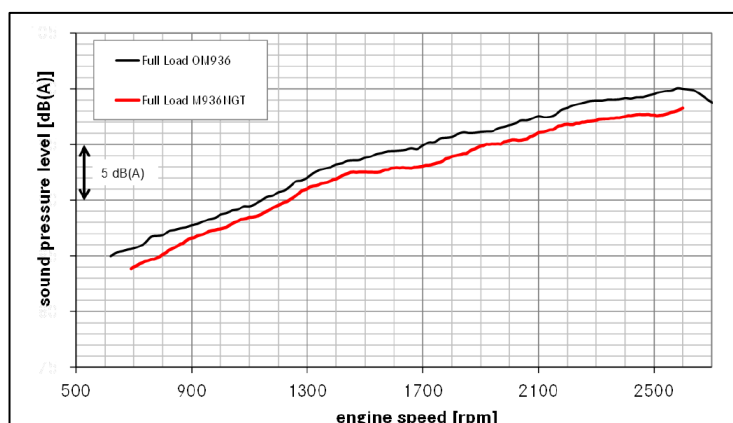
Tidigare har man ofta ansett att det varit enkelt att klara emissionskraven för NO_x med gasdrivna motorer – väsentligt enklare än med dieseldrivna motorer. Förvisso har man haft problem att klara kraven för metanemissioner, speciellt med hänsyn till åldring och försämring av katalysatorn, men uppföljning och krav på hållbarheten har inte varit rigorös. Förutsättningarna har emellertid ändrats ganska drastiskt de senaste åren. Numera är det svårt att klara Euro VI med gasdrivna motorer och bästa tänkbara avgasreningsteknik måste tas till för att klara de nämnda kraven. Att utvecklingen lett till att den teknik som föredras, nämligen trevägskatalysatorn, blivit förhärskande för Euro VI har också en del följder för bränsleförbrukningen. Den är väsentligt högre för trevägskatalysatortekniken än för motorer med

mager förbränning. Det torde ha minskat konkurrenskraften för gasdrivna bussar i förhållande till konventionella dieseldrivna bussar; åtminstone när det gäller bränsleförbrukningskriteriet. Tillverkarna försöker förstås minska bränsleförbrukningen även för trevägskatalysator tekniken. Det finns ett antal exempel på sådan utveckling. Några av dessa tekniska lösningar berörs nedan.

I den tidigare nämnda studien från Heuser m.fl. diskuteras bl.a. motiven för att välja trevägskatalysator [24]. För att minska ökningen av bränsleförbrukningen har användningen av EGR i kombination med utveckling av förbränningssystemet (snabb förbränning) optimerats. Heuser m.fl. har också studerat användningen av det så kallade Millersystemet för att minska bränsleförbrukningen. Med Millersystem minskas den effektiva insugningstakten genom att korta av tiden som inloppsventilen är öppen, eller genom att förskjuta inloppskammen (tidigare eller senare). Detta leder till att mindre mängd luft sugas in och det måste kompenseras genom att öka laddtrycket för att vridmoment och effekt ska kunna bibehållas. Fördelen är att temperaturen blir lägre i förbränningsrummet och risken för knackning minskar, vilket ger möjligheter till högre kompressionsförhållande, tidigare tändning eller ändring av någon annan parameter med positiv inverkan på bränsleförbrukningen. Vid fulleffektvarvtalet kan bränsleförbrukningen minskas med drygt 3 % medan den är oförändrad eller marginellt högre vid andra driftsfall.

Studien av Heuser m.fl. sammanfattar statusen för forskning och utveckling av gasdrivna motorer till tunga fordon. Det finns dock kommersiella motorer som redan använder en del av tekniken. Ett exempel är en studie av Benz m.fl. vid Mercedes [25]. Mercedes har tidigare haft två gasdrivna motorer i produktion, en på 6,9 och en på 12 liter. Båda ersätts nu av en motor på 7,7 liter. För att ersätta den större motorn med en mindre krävs en väsentlig ökning av specifik effekt och vridmoment. De tekniska lösningar som krävs för detta diskuteras i studien. Liksom i studien av Heuser används kyld EGR och trevägskatalysator. Motorns förbränningsrum har också optimerats för snabb förbränning för att "tåla" mycket EGR. Mercedesmotorn använder även Millersystem. Sett från en strikt jämförbarhetsynpunkt enligt kriteriet för teknikneutralitet borde man jämföra denna motor med motorer för andra bränslen som också använder Millersystem. Millersystem har också en positiv effekt på bränsleförbrukningen inte enbart för ottomotorer utan även för dieselmotorer. För tillfället finns det dock inte några tunga dieselmotorer med Millersystem i produktion. Tekniken förekommer dock för fartygsmotorer och variabla ventiltider som kan användas i just det syftet har nyligen introducerats på dieselmotorer i personbilar.

En väsentlig fördel som brukar framhållas med gasdrivna motorer är den lägre bullernivån. Detta diskuteras på flera andra ställen i föreliggande rapport men förtjänar att nämnas även här. Inverkan på buller har kvantifierats i studien av Benz m.fl. [25] och resultat vid full last för två jämförbara motorer visas i Figur 11. Bullernivån för båda motorerna ökar med ökande varvtal men är alltid lägre för den gasdrivna motorn (M396NGT).



Figur 11. Jämförelse mellan buller från en gasdriven och dieseldriven version av Mercedes 936 motorn (källa: Mercedes)

Författarna till föreliggande rapport kan sätta in skillnaden i ett sammanhang. I det mest relevanta arbetsområdet vid ca 1 200 r/min motsvarar skillnaden i buller ca 100 r/min i motorvarvtal. Förutsatt att utväxling i växellådan och varvtalsområde är lika, dvs. att motorerna körs vid samma varvtal, kommer gasmotorn alltid att bullra mindre. För bensin- respektive dieseldrivna motorer till personbilar körs dieselmotorerna som

regel på betydligt lägre varvtal och kan därför ofta vara tystare i t.ex. motorvägsfart än motsvarande bensindrivna bilar av just av den anledningen. Så är inte fallet med gasdrivna bussmotorer. Gasmotorerna är derivat av dieselmotorer och det är vanligt att maximala varvtalet behålls, eller bara ökas något. Den relativa skillnaden i buller mellan gas- och dieselmotorer torde dessutom vara större vid tomgång; något som brukar märkas vid busshållplatser. Ifall motorn stängs av vid stopp, som t.ex. är fallet för hybridbussar, har denna potentiella fördel förstås mindre betydelse.

4.4.4 Etanolbussar

Den senaste tiden har inga etanoldrivna bussar sålts och det finns ingen etanoldriven bussmotor som är certifierad för Euro VI. Sannolikt går det rent tekniskt att utveckla en etanolmotor som klarar Euro VI ifall det finns efterfrågan från kunderna. Etanolmotorer har dock bara beaktats översiktligt i detta kapitel.

Det förbränningssystemet för etanolmotorer som används i dag bygger på högre kompressionsförhållande och användningen av tändförbättrare. Det finns många andra alternativ men då inget av alternativen har använts i en kommersiell applikation de senaste åren förutsätts detta alternativ vara det enda tillgängliga inom en nära framtid. I princip fungerar etanolmotor som en dieselmotor för dieselolja där man vidtagit vissa åtgärder för att kompensera för de annorlunda kemiska och fysikaliska egenskaper som etanolen har. Bränslet måste t.ex. innehålla en tändförbättrare för att öka tändvilligheten, dvs. cetantalet. Eftersom tändförbättraren är en dyr tillsats i bränslet (ED95) försöker man minska halten genom att öka kompressionsförhållandet. Det höga kompressionsförhållandet ligger över den optimala nivån för dieselmotorer och leder bl.a. till lägre specifik effekt och vridmoment jämförts med motsvande motor som drivs med dieselolja. I senare kapitel diskuteras effekterna av detta på bränsleförbrukningen.

När det gäller emissioner kan man först börja med att konstatera att avgasreningstekniken för en etanolmotor som är avsedd att klara Euro VI är snarlik den för motsvarande motor som drivs med dieselolja. SCR måste användas för att reducera NO_x , trots att NO_x -bildningen generellt är lägre med etanolbränsle. SCR kan också användas i kombination med EGR för att nå en bättre kompromiss mellan NO_x och bränsleförbrukning på samma sätt som diskuterats ovan för den dieseldrivna motorn. Möjligen skulle man kunna tänka sig en fördel med att *inte* kyla EGR:en (t.ex. genom by-pass eller separat slinga med "varm" EGR) vid vissa varvtal och laster för att därigenom inte behöva använda så högt kompressionsförhållande och/eller lika hög halt tändförbättrare.

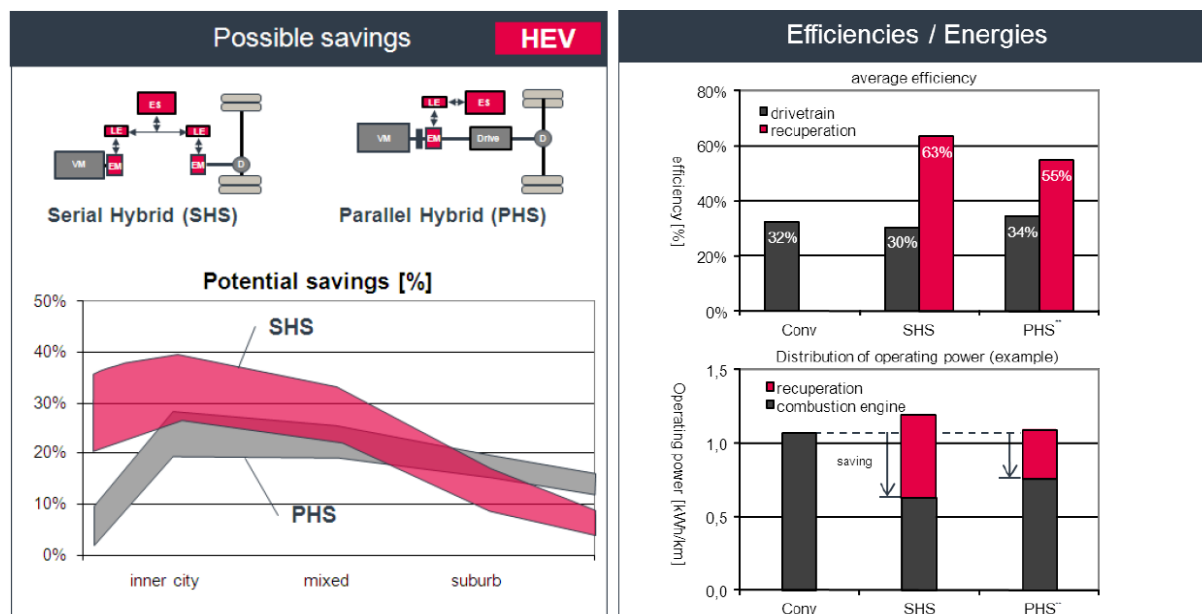
Kraven på antal partiklar i Euro VI är så höga att en etanolmotor av det slag som diskuteras med största sannolikhet skulle behöva partikelfilter. Partikelfilter ger också en större marginal till gränsvärdet för partikelmassa, vilket är en fördel även om man genom utveckling möjligen skulle kunna klara det kravet utan filter. Som nämnts tidigare finns en studie där partikelfilter använts på en etanolmotor [18]. I det fallet var det dock fråga om ett partikelfilter som var optimerat för en motor för dieselolja. För en tänkt etanoldriven Euro VI motor bör man nog förutsätta att filtret optimerats för etanoldrift.

Några direkta tekniska hinder för att klara emissionskraven i Euro VI har inte identifierats av författarna. Det är nog snarare en fråga om den ekonomiska konkurrenskraften för etanol som drivmedel i kombination med kundernas efterfrågan som avgör ifall etanoldrivna bussar även i framtiden kommer att erbjudas av någon busstillverkare (se även enkätsvar senare i rapporten).

4.4.5 Elhybridbussar

De vanligaste hybridsystemen är av typerna serie- eller parallellhybrid men det finns också en variant som skulle kunna kallas "kombinerad" hybrid, dvs. ett mellanting mellan dessa två. Hybridsystemet i Toyotas Prius är (liksom i en del andra modeller från samma tillverkare) av kombinerad typ. Av någon anledning tycks inte detta system ha varit lika attraktivt för tunga fordon men de två övriga systemen finns i produktion. Det förutsätts här att serie- respektive parallellhybrider är allmänt kända och någon genomgång av funktionsprinciperna görs inte här (en översiktsbild av respektive system finns dock i Figur 12 nedan).

Det primära syftet med hybridsystem är att minska bränsleförbrukningen. Med laddhybrider finns även möjlighet att substituera en del av bränslet med el. Serie- respektive parallellhybrider har olika potential för minskning av bränsleförbrukningen vid olika typer av driftsfall. I vänstra diagrammet i Figur 12 visas resultat från en studie av Achenbach m fl. på MAN [26]. Ovanför diagrammet finns förresten också schematiska bilder av serie- respektive parallellhybridsystemen som illustrerar funktionen.



Figur 12. Potential för bränsleförbrukning och effektivitet/energiflöde för serie- och parallellhybrider (källa: MAN)

Resultaten i Figur 12 är resultat från en tillverkare av bussar under de förutsättningar som just de undersökt potentialen till minskad bränsleförbrukning. MAN förespråkar och marknadsför seriehybrider. Eftersom andra tillverkare förespråkar andra hybridlösningar kanske de kommit fram till andra resultat men de övergripande skillnader mellan systemen som illustreras i diagrammet torde ändå vara relevanta. Seriehybrider (SHS) kommer bäst till sin rätt i tät trafik i innerstaden. I förorter, eller mindre tät trafik, är parallellhybriden (PHS) att föredra. Orsaken till att seriehybriden är "sämre" i det senare fallet är enligt föreliggande rapportens författare bl.a. att seriehybriden inte har en direkt mekanisk överföring av kraften mellan motor och hjul som parallellhybriden utan använder ett elektriskt drivsystem som har lägre verkningsgrad än det mekaniska. I den driftsituation där seriehybriden är "bäst" anger MAN en förbättring av bränsleförbrukningen med 25-40 %. Under andra typer av körmoder är potentialen betydligt mindre.

Den primära fördelen med hybridisering är, som nämnts, minskningen av bränsleförbrukningen och i laddhybridfallet även substitution av bränslet med el. Det är inte nödvändigtvis så att avgasemissionerna minskar med hybridisering. För man exempelvis över kraft elektriskt i stället för mekaniskt leder det inte alls till en minskning av emissionerna. Det elektriska systemet har ju större förluster än det mekaniska och förbränningsmotorn måste därmed utföra större arbete för samma framdrivning. Positivt är dock att man "sparar" bränsle genom regenerativ bromsning och det är också positivt för emissionerna. Teoretiskt finns således för- och nackdelar med hybridsystem som kan ge både minskning respektive ökning av emissionerna. Med en seriehybrid kan t.ex. förbränningsmotorn i den mest extrema formen av reglering gå med konstant varvtal och belastning (ifall det nu skulle vara en fördel...). Så

enkelt är det dock inte. Man vill slippa mellanlagring av energin i batteriet eftersom det leder till ökade förluster och därför måste effekten för förbränningsmotorn på något sätt *moduleras*, dvs. följa effektbehovet som dikteras av körcykeln. Minskar man variationen av varvtal, dvs. kör motorn på konstant (eller nära nog konstant) varvtal, kommer motorn att utsättas för ökade transienter med avseende på belastningen i stället. Detta kan faktiskt leda till en ökning av emissionerna. I ett hybridsystem skalar man gärna ned motorn för att minska bränsleförbrukningen. Det leder ofta till att motorn måste gå på högre medellast. Det kan var en för- respektive nackdel beroende på vilken emissionskomponent det är fråga om. Generellt brukar det vara en fördel för efterbehandlingen om lasten ökar eftersom avgas-temperaturen då ökar och katalysatorn inte "slocknar". Att motorn stängs av då och då minskar flödet genom avgassystemet till noll under låga laster och tomgång. Det är också en fördel för den katalytiska reningen, då medeltemperaturen därigenom hålls högre. En ökad last kan dock ge ökade specifika NO_x emissioner, speciellt vid riktigt hög last där mindre EGR kan användas än på låg last, eller där omsättningen i katalysatorn minskar (vilket den gör vid hög temperatur). Detta kan t.ex. kompenseras genom ökad mängd urea till SCR systemet. En generell, och övergripande, fördel med hybridsystem ur emissionssynpunkt kan tyckas vara att bränsleförbrukningen minskar. Förutsatt att de specifika emissionerna *inte* ökar skulle det innebära en fördel genom att mindre bränsle förbrukas och att mindre emissioner då genereras. Tyvärr är det, som resonemanget ovan visar, inte fullt så enkelt. Detta berörs också i kapitel 6, där en del testdata redovisas.

Laddhybriden är som nämnts ett ytterligare alternativ. En konventionell elhybrid kan med fördel också användas som laddhybrid, förutsatt att batterierna är tillräckligt stora och tål hög urladdning. Bussar i stadstrafik har, som applikation, en fördel framför t.ex. privatägda personbilar genom att infrastrukturen för snabbbladdning kan ordnas enklare. Det är därför ganska troligt att laddhybrider i framtiden kommer att utgöra en försvarlig andel av den totala hybridbussparken. En fördel för laddhybrider gentemot rena elbussar är att batterierna inte måste dimensioneras för så lång räckvidd och att förbränningsmotorn ju finns som "reserv" när elen i batterierna tryter. Det innebär en ökad flexibilitet vad gäller applikationen, samt lägre vikt för bussen. Det sistnämnda skulle t.o.m. kunna innebära en högre effektivitet för el i TTW perspektiv i laddhybridfallet än i elfallet, just p.g.a. den lägre vikten. Någon sådan analys har emellertid inte gjorts i denna studie.

4.4.6 Eldrivna bussar

Eldrivna bussar behandlas inte utförligt i denna studie. Orsaken är att det inte funnits några kommersiella elbussar från någon av de större leverantörerna ute i drift. Konverterade bussar har inte bedömts relevanta i jämförelsen. Några data från busstillverkarna har heller inte erhållits.

Generellt kan man säga att eldrivna bussar har fördelen av nollemissioner lokalt och lågt buller. TTW effektiviteten, eller från batteri till hjul, är också hög i förhållande till konvent-

ionella bussar. Jämfört med personbilar bör man dock konstatera ett par skillnader när det gäller övergripande förutsättningar. För det första är effektiviteten i drivsystemet i tunga fordon generellt högre än i personbilar. En typisk siffra för en bensinbil är en medelverkningsgrad på 18 % i en körcykel för certifiering, kanske något högre för moderna personbilar. Dieslbilar ligger ytterligare någon procentenhet högre än bensinbilar. För tunga fordon kan dock medelverkningsgraden vara dubbelt så hög som den nämnda siffran, även om den är något lägre i ett körmönster för typisk innerstadstrafik (se kapitel 6). I relativa jämförelser för energianvändning borde alltså en batteridrivna buss ha sämre förutsättningar att hävda sig än när motsvande jämförelser görs för personbilar. En annan faktor att beakta är att den typiska körsträckan per dag som regel är högre för en buss än för en personbil. Detta varierar ju förstås från fall till fall och generellt borde det även vara motiverat att eldrivna personbilar har så lång daglig körsträcka som möjligt eftersom inköpspriset är högt medan driftskostnaden för elen är låg i förhållande till drivmedelskostnaden för en konventionell bil. För bussar i linjetrafik finns dessutom fördelen att de kan ha en egen infrastruktur för snabbbladdning, vilket inte alltid är lika enkelt för personbilar.

När det gäller emissioner är fördelen med eldrivna bussar inte bara nollemissioner lokalt. Den elanvändning, nordisk elmix, som förutsatts i denna studie har låga emissioner av såväl de flesta reglerade emissionskomponenter som klimatgaser. Det beror på att en stor andel av elmixen kommer från vattenkraft och kärnkraft, där utsläppen är låga. Man kan naturligtvis se på elgenereringen som marginalet eller som elmix. Det senare fallet har valts här, då studien främst ska ge en "ögonblicksbild" av situationen i dag. Det praktiska problemet för marginalet är dessutom att man bör undersöka en mängd olika alternativ.

En faktor som kraftigt minskar motiven för rena elbussar framgent är att emissionerna för konventionella bussar minskat kraftigt och förväntas minska ännu mer i framtiden. När det gäller den aspekten är det också viktigt att notera att en hälsofaktor med stark koppling till trafiken är partikelemissioner. Partiklar härrör från flera källor där de största är avgasröret och kontakten mellan däck och vägbana. Den sistnämnda källan ger upphov till större partiklar medan de minsta främst kommer från avgasröret. När nu utsläppen av partiklar från avgasröret minimeras till en mycket låg nivå kvarstår partiklar från däck och vägbana. Båda typerna av partiklar – stora som små – tycks ha hälsoeffekter, även om det kan vara fråga om helt olika hälsoeffekter. Detta berörs inte mer här men man kan bara konstatera att det finns hälsoeffekter som är kopplade till större partiklar som PM_{10} och $PM_{2,5}$. Även om elbussar kan ha kvarstående marginella fördelar för lokala utsläpp av de minsta partiklarna finns ingen fördel för de större partiklarna. Möjligen t.o.m. tvärtom eftersom en tyngre buss ger upphov till ökade partikelemissioner från däck och vägbana. Generering av partiklar från däck och vägbana är i någon mån proportionell mot fordonets vikt.

4.4.7 Alternativa hybridsystem

I den här studien diskuteras främst elhybrider. Det kan dock vara värt att nämna att det finns en mängd andra alternativ också. Inget av alternativen har emellertid nått lika långt i utvecklingen som elhybrider. Några av de tänkbara alternativen är:

- Elhybrider med andra energilager än kemiska batterier
- Kinetiska hybrider
- Hydrauliska hybrider
- Pneumatiska hybrider

Beteckningarna är i sig någorlunda entydiga, så någon grundlig beskrivning behövs inte. Kinetiska hybrider använder svänghjulslager och för hydrauliska och pneumatiska hybrider används tryckluftslager. I det senare fallet finns en viss förbistring kring nomenklaturen då en del tillverkare refererar till hydrauliska hybrider som "Hybrid Air" (se nedan). Den nomenklaturen har inte använts här.

Superkondensatorer, svänghjulslager och tryckluftslager har hög effekttäthet men låg energitäthet. De lämpar sig därför inte lika bra som kemiska batterier som enda energilager för fordon utan passar bäst i hybridsystem. I superkondensatorer och svänghjulslager kan energin i lagret överföras elektriskt tämligen enkelt medan det är svårare för pneumatiska lager. Superkondensatorer och svänghjulslager kan i teorin användas som enda lager för elhybrider. På grund av den begränsade energitätheten är de dock av praktiska skäl bäst lämpade för parallellhybrider. Seriehybrider kräver större energilager och här är nog kemiska batterier det bästa alternativet, åtminstone som det "stora" energilagret även om kombinationer är tänkbara av flera skäl (med detta sagt kan nämnas att även hydrauliska seriehybrider utvecklas).

Den kinetiska hybriden är på sätt och vis den enklaste av alla hybrider. Här behövs ingen egentlig energiomvandling, utan den kinetiska energin i fordonet *överförs* bara till kinetisk energi i svänghjulsdraget vid inbromsning och åt motsatt håll vid acceleration. Kan denna överföring göras med hög verkningsgrad blir även den totala verkningsgraden väldigt hög. De två flaskhalsar som funnits hittills har varit den steglösa transmission som behövs och det faktum att själva svänghjulsdraget inte heller varit fullt utvecklat. Företaget Torotrak (fler exempel finns) utvecklar en steglös transmission som kan lösa det problemet och Torotrak köpte i början av 2014 företaget Flybrid, som utvecklar svänghjulsdrag (det finns även andra företag som är verksamma inom detta område) [27]. Tekniken testas och utvecklas nu i samarbete med flera biltillverkare, bl.a. Volvo Car, men ett koncept testas också för en buss i midistorlek i samarbete med busstillverkaren Wrightbus (Figur 13) [28,



Figur 13. Kinetisk hybrid (Wrightbus)

29]. Eftersom lagringskapaciteten i svänghjul är begränsad i förhållande till kemiska batterier lämpar sig en kinetisk hybrid bäst i ett parallellhybridsystem.

När det gäller hydrauliska hybrider bör först nämnas att en del tillverkare (exv. PSA, Peugeot/Citroën) benämner dem "Hybrid Air". En orsak kan vara att energin lagras i form av komprimerad kvävgas i trycklufttankar. Vanligast är dock att de klassificeras som hydrauliska hybrider, eftersom systemet i övrigt använder hydraulik (i analogi med elektriska maskiner i elhybrider). Hydraulmotorer har en enormt hög effekttäthet. Exempelvis kan en hydraulmotor av knytävsstorlek generera en effekt på upp till 500 hk. En elmotor för samma effekt – eller en förbränningsmotor för den delen – är avsevärt mycket större.

Det kanske mest allmänt kända exemplet på utveckling inom området är PSA (Peugeot/Citroën) som tillsammans med Bosch utvecklar tekniken för små personbilar [30]. Tekniken sägs kunna introduceras under 2016. En minskning av bränsleförbrukningen med 30 % i NEDC körcykeln och upp till 45 % i ren stadstrafik uppges. Det bör också framhållas att amerikanska naturvårdsverket (EPA) sedan många år har gett stöd till tekniken men då främst för användning i distributionsfordon och fordon av liknande storlek [31]. Ett exempel på utveckling av tekniken för stadsbussar är Altair som utvecklar en hydraulisk hybrid av seriehybridtyp [32, 33]. Altair hävdar att tekniken kan ge 30 % bättre "mileage", dvs. 30 % fler mil per mängd bränsle⁹, och 30 % lägre kostnader för användaren jämfört med dagens bästa elhybridbuss [33].



Figur 14. Altair hydraulisk hybridbuss (serietyp)

Pneumatiska hybrider har främst diskuterats för lätta fordon men skulle mycket väl kunna vara tänkbara även för bussar i tät stadstrafik. Det finns dock inte så värst mycket publicerat om detta och denna option berörs därför inte mer här, förutom följande kommentarer. I mätningar enligt NEDC körcykeln har ETH i Zürich uppnått en sänkning av bränsleförbrukningen mellan ca 25 till 35 % för personbilar [34]. Det är i nivå med den sänkning som kan åstadkommas med elhybrider. Sänkningen kan inte enbart hänföras till hybridiseringen utan innefattar också synergier med själva förbränningsmotorn.

I teorin, och även i en del praktiska försök, kan kinetiska och hydrauliska hybrider (svänghjuls- och tryckluftlager) tillvarata bromsenergin effektivare än en elhybrid. Hur väl pneumatiska hybrider skulle fungera i sammanhanget är inte tillräckligt väl utrett (än...), då den ovannämnda referensen även inkluderar andra effekter. Ifall de teoretiska fördelarna för kinetiska och hydrauliska hybrider kan förverkligas i praktiskt användbara fordon kan de i framtiden bli mycket konkurrenskraftiga gentemot elhybrider. Detta gäller inte mist ekono-

⁹ Uttryckt som relativ minskning av bränsleförbrukningen blir det -23 % (1/1,3-1).

miskt eftersom de kostnadsmässigt torde ha fördelar som elhybrider med sina dyra batterier inte kan matcha. Den tidshorisont och de syften som denna studie har medför dock att de inte beaktas vidare här.

5 BRÄNSLEN FÖR BUSSAR

I detta kapitel beskrivs **kortfattat** hur olika drivmedel produceras – både från fossila och från förnybara råvaror. Biodrivmedel kan framställas från många olika typer av biomassa och på ett flertal olika sätt. De fem tekniker som listas nedan täcker in de produktionsvägar som finns idag och som planeras.

- Fermentering
- Hydrering av växtolja (HVO)
- Anaerob rötning
- Termisk förgasning
- Växtpressning och oförestning (FAME)

För den som vill fördjupa sig i hur biodrivmedel producera och vilka potentialer som finns så hänvisas läsaren till en rapport från Ecotrafic (Biodrivmedel nu och år 2030) [15].

5.1 Diesel

Med diesel menas här konventionellt dieselbränsle tillverkat av fossila råvaror. Dieseln har alltså sitt ursprung i råolja. Sammansättningen av råolja varierar kraftigt men kan sägas bestå av en rad olika kolväten samt oönskade ämnen såsom olika svavelföreningar. På ett raffinaderi avskiljs oftast numera svavelföreningar och dessa säljs vidare till den kemiska industrin. Råoljan hettas upp och leds in ett destillationstorn. Lätta kolväten stiger upp mot tornets topp och tyngre fraktioner hamnar i tornets botten. Kolväten med en kokpunkt mellan ca 160 – 360°C (10 – 20 kolatomer) är dieselfraktionen och denna fraktion tas ut som diesel i destillationstornet.

Råoljans sammansättning sätter gränser för hur stor andel diesel (och bensin) man kan få ut. Beroende på hur efterfrågan ser ut på olika petroleumprodukter kan man på raffinaderierna med olika metoder styra produktionen. Metoder för att få fram mer diesel kan exempelvis vara termisk eller katalytisk krackning. Vid krackning delas längre kolväten upp i mindre delar, d.v.s. man får fram kortare kolvätekedjor.

5.2 HVO

HVO (Hydrerad Vegetabilisk Olja) tillverkas av bland annat råtallolja, palmolja, slaktavfall och vegetabiliska avfallsoljor. Av den HVO som tillverkas i Sverige så har nästan 50 % råtallolja använts som råvara. Råtalloljan kommer bland annat från trädens kåda och utvinns ur masbrukens svartlutar. Talloljan är en biprodukt från tillverkning av sulfatcellulosa. Efter att oljan avskilts från svartluten så hettas den upp under närvaro av en katalysator och vätgas. På detta sätt bildas en produkt som är nära på identisk med konventionell diesel. Dock måste man via en kemisk process se till att raka kolväten grenas. Denna process kallas iso-

merisering och anledningen till att man vill få grenade kolväten är att dieselbränslet då kan användas vid lägre temperaturer. Preem var det första företaget som började använda HVO. De blandar cirka 30 % HVO i fossil diesel och Preems kallar sin produkt för Evolution. Denna 30 % inblandning motsvarar enligt Preem en CO₂-reduktion på cirka 27 % [15] [35]. Även övriga drivmedelsleverantörer säljer numera HVO. Exempelvis så har Statoil två stationer (Götene och Länna) där HVO100 säljs (100 % HVO).

5.3 ED95

ED95 består till 95 procent av bioetanol och 5 procent tändförbättrare. Bränslet innehåller även denatureringsmedel samt smörj- och korrosionsadditiv. Fram till år 2014 har det på grund av patenthinder bara funnits en tillverkare av ED95 - Sekab. Efter att patentet gått (sommaren 2014) ut så står antagligen fler tillverkare för dörren. Bland annat har Agroetanol (ägs av Lantmännen) som har landets största etanolfabrik tagit fram en egen produkt som kan användas till de fordon som körs på ED95.

Etanol tillverkas ur socker; om råvaran är stärkelse krävs att den omvandlas till socker vilket brukar ske med enzymer. Jäsning är långsam eller tar några dagar vilket kräver stora jäskärl. Innan jäsningen krävs att kolhydraterna löses upp i vatten och steriliseras vid 120°C. Vete som är en vanlig råvara innehåller också protein. Proteinet blir kvar och tillsammans med jäskulturen kan de filtreras av. Filterkakan kan användas vid tillverkning av foder eller tillverkning av metan genom rötning, se tillverkning av biogas. Efter jäsningen destilleras etanolen av i flera steg [15, 36, 37].

5.4 Biogas – och fordonsgas

Med fordonsgas avses en gas som i huvudsak består av metan [CH₄]. Metan kan endera ha fossilt ursprung och kallas då ofta för naturgas eller om den inte har ett fossilt ursprung så kallas gasen för biogas. När man tankar fordonsgas så kan det alltså vara en blandning av naturgas och av biogas. 2013 såldes ca 1.5 TWh fordonsgas och andelen biogas var över 50 % [38].

Med biogas menas metan som framställs från fossilfria råvaror. Metanet bildas genom att man rötar avfallsprodukter som exempelvis avloppsslam, livsmedelsavfall, gödsel, slaktreser, vissa grödor, glycerol mm. (glycerol som används till biogasproduktion är en biprodukt från tillverkning av FAME). Då organiskt avfall bryts ner i en syrefri miljö (anaerob nedbrytning) så bildas kolväten (varav metan är ett) och koldioxid. Innan man kan påbörja rötningen så måste det organiska materialet förbehandlas genom malning och torkning, alternativt blötas så att det får rätt fuktinnehåll. Visst material måste också förbehandlas kemiskt eller termiskt för att de senare ska kunna rötas. Genom att höja temperaturen över 70°C så minimeras risken för att bakterier ska bildas och orsaka smitta. Detta kallas för hygiensteg. Bildning av metan kan sägas ske i tre steg:

- Hydrolys
- Syrabildning
- Metanbildning

Förutom metan bildas även andra gaser såsom olika kolväten, ammoniak, vätesulfid, koldioxid med flera. Gaserna filtreras och tvättas i skrubbar för att renas från partiklar med mera samt för att höja koncentrationen av metan. Detta brukar benämnas uppgradering till fordonskvalitet [15, 38].

Metangas (biogas) kan också tillverkas genom förgasning av biomassa. En sådan anläggning har nyligen uppförts i Göteborg, Gobigas. Anläggningen är för tillfället under uppstart, vilket betyder att inga data ännu finns med i Energimyndighetens rapportering för biogas. Inga data från den här anläggningen finns därför heller med i beräkningsunderlaget i föreliggande studie.

5.5 Biodiesel (FAME)

RME är ett exempel på ett drivmedel tillverkat från rapsolja via omförestning med metanol. Råvaror kan vara oljor och fetter, normalt vegetabiliska men en del animaliska oljor och fetter förekommer också. Ett samlingsnamn är beteckningen FAME (Fatty Acid Methyl Ester) men i dagligt tal används ofta också benämningen biodiesel¹⁰. När man i Europa använder ordet biodiesel så är det underförstått oftast RME som menas. Det finns även andra typer av biodiesel. Man kan använda i princip vilken typ av fett som helst för tillverkning av biodiesel. Valet styrs i huvudsak av pris och tillgång på råvaran. I Sverige är raps vanligast och bränslet benämns då RME eller rapsbränsle. I USA används oftast sojaolja eller majsolja. Även t.ex. palmolja, senap och jathropa kan användas och i framtiden kan olja från alger bli ett viktigt tillskott. Vidare kan man även använda animaliska fetter såsom ister och talg. Valet av råvara påverkar bränslets egenskaper, inte minst med avseende på egenskaperna i kyla. Vissa ger ett bränsle som i ren form endast är flytande vid plusgrader. Vintertid kan dessa därför endast användas med tillsatser eller för inblandning i vanlig diesel, eller kanske inte alls i en del fall.

Biodiesel är en gulaktig vätska med flampunkten $\sim 150^{\circ}\text{C}$ och därmed ganska svårantändbar. Biodiesel är biologiskt nedbrytbar och icke-giftig. Andelen biodiesel i bränslet anges ofta med ett B följt av andelen i procent. Till exempel avser B5 ett bränsle bestående av 5 % biodiesel och 95 % diesel. Tillverkning (även i liten skala) är förhållandevis enkel. Genom att tillsätta

¹⁰ Det finns en del begreppsförvirring angående biodiesel, då det i vissa länder på kontinenten står för en produkt som endast är en låginblandning av FAME/FAEE i dieselolja, t.ex. 30 % FAME i diesel. Beteckningen förekommer också för drivmedel med lägre inblandningshalt. Med biodiesel i den här rapporten avses endast "ren" biodiesel; inga blandbränslen.

metanol och lut i oljan startar man omförestningen. Blandningen självseparerar i biodiesel och glycerol men behöver renas ytterligare för att uppfylla gällande specifikationer. Biodiesel i "ren" form kan användas i enstaka moderna dieselmotorer under förutsättning att bränslet uppfyller gällande normer. Biodiesel som säljs på mackar innehåller i likhet med andra bränslen normalt tillsatser för att få förbättrade egenskaper.

I Sverige finns i dag en stor tillverkare av RME, Perstorp i Stenungsund. För att göra 1 ton RME går det åt ca 2,5 ton kg raps (ungefär vad man i snitt får ut per hektar). All raps kan givetvis inte bli RME då raps även är en viktig livsmedelsråvara (olja, margarin) och råvara till annan industri såsom färg och tensidindustrin. Rapsfröet består till ca 45 % av fett och 55 % råprotein. Råproteinet används som en viktig foderkälla för många olika djur.

5.6 El – nordisk elmix

När man använder el som "drivmedel" till fordon så kommer genast frågan upp om hur elen har producerats och hur denna produktion och distribution påverkar miljö och klimat. Beroende på vad man väljer så får man mycket stora skillnader i ett eldrivets fordon miljöegenskaper. Exempelvis så skiljer det en faktor 22 om man väljer svensk eller europeisk elmix i form av CO₂-utsläpp. I olika rapporter används allt ifrån ren vatten- eller vindkraft till el producerat av brunkol eller olja. Det finns givetvis inget rätt eller fel i valet utan ofta så styrs valet av vad rapportförfattaren vill uppnå med sin rapport.

Inför detta arbete så fördes diskussioner om vilken elproduktion vi skulle använda, ska vi ta vattenkraft, svensk elmix, nordisk elmix, europeisk elmix eller något annat. Valet föll på att använda den nordiska elmixen. Främsta anledningen till valet var att Energimyndigheten [39] säger (föreskriver) att nordisk elmix ska användas. "Metoden i förnybarhetsdirektivet tillåter inte att kontrakterad el används. EU-kommissionen avser att uppdatera metoden i förnybarhetsdirektivet Bilaga V, när ett tillförlitligt system med ursprungsmärkning är på plats i hela unionen kan detta kanske komma att ändras. **Nordisk elmix föreskrivs vid beräkning av växthusgasutsläpp från elanvändning vid produktion av biodrivmedel eller flytande biobränslen i Sverige eftersom el i Sverige handlas från en nordisk marknad.** Används el från en elproduktionsanläggning som inte är sammankopplad med elnätet får bränslemixen från den anläggningen användas." Dock så omfattas inte elfordon av hållbarhetskriterierna. "Elanvändning i produktionskedjan (vid framställning av biodrivmedel eller flytande biobränslen eller t.ex. elanvändning i tåg vid transport av råvaror eller slutprodukt) **ska belastas med genomsnittliga utsläpp från produktion och distribution av el i den region där elen används. I Norden är det Nordisk elmix som gäller.**"

Emissioner av CO₂ för produktion för de nämnda typerna av elproduktion är:

- Svensk elmix [20-25 g CO₂ per kWh]
- Nordisk elmix [75-100 g CO₂ per kWh]
- Europeisk elmix [450 g CO₂ per kWh]

I denna studie har värdet 87,5 g CO₂ per kWh använts, då det är mitt i den spann som redovisas för Nordisk elmix.

6 EMISSIONER OCH FÖRBRUKNING – BUSSAR

I kapitel 4 gjordes en översiktlig beskrivning av olika tekniker som bl.a. energiomvandlare, energilager och drivsystem av hybridtyp. En liknande översikt för drivmedel gjordes i kapitel 5. I detta kapitel (6) görs en utvärdering av emissioner och bränsleförbrukning för olika kombinationer av energiomvandlare, drivsystem och drivmedel. I detta kapitel handlar det om en mer konkret bedömning av nivån för Euro VI bussar, snarare än den översikt av tekniken som behandlades i kapitlen 4 och 5. Alla tre kapitel hänger dock samman och kan delvis vara överlappande.

6.1 Underlag

6.1.1 Testcykler

Som nämnts tidigare är det viktigaste underlaget till avgasemissioner och bulleremissioner för bussarna de certifieringsdata som erhållits från tillverkare och myndigheter. Certifieringsdata för emissioner erhålls emellertid inte uttryckta i en enhet per körd kilometer (t.ex. g/km) utan som en enhet per uträttat arbete, dvs. per kilowattimme (t.ex. g/kWh). För att kunna räkna om data från den sistnämnda till den förstnämnda enheten måste man veta hur många kWh per km som bussen använder i det specifika körmönstret.

Vidare är det inte nödvändigtvis så att belastningskollektivet för körcykeln som används vid certifiering är fullt ut representativt för körning med bussar i stadstrafik. Till Euro VI används en ny testcykel, WHTC (World Harmonized Transient Cycle) som, per definition, är harmoniserad för hela världen även om få länder utöver EU ännu använder den¹¹. WHTC är en testcykel för motorer men som underlag till den finns även en körcykel för chassidynamometer, WHVC (World Harmonized Vehicle Cycle), som baseras på samma loggade data från verklig trafik som ligger till grund för WHTC. Det betyder dock inte per automatik att WHVC och WHTC skulle ge exakt lika resultat. I fordon används ju växellåda, slutväxel mm mellan motor och hjul. Dessa komponenter är ju olika i olika typer av fordon. Belastningskollektivet kan därför bli något annorlunda i WHVC än i WHTC, som ju är normen för certifiering. För hybridfordon kan skillnaden naturligtvis bli avsevärt mycket större. Motorn är ju här t.ex. ofta avstängd under faser av körningen medan den i andra faser belastas mer än en konventionell motor. Något "rättvisande" sätt att testa motorer i hybridsystem finns ännu inte. För lätta fordon gäller ju kraven för hela fordonet – inte motorn – och i här har testmetoder utvecklats även för hybridfordon. Som statusen är i dag testas enbart motorn till tunga fordon. Nya test- och beräkningsmetoder diskuteras dock för hybrider som kan införas i framtida bestämmelser i EU.

¹¹ Det finns också en kompletterande stationär testmetod, WHSC (World Harmonized Stationary Cycle), men den är mindre relevant för stadsbussar och diskuteras inte vidare här.

WHTC består av tre faser, "urban", "rural" och "motorway", där de två förstnämnda kan anses representativa för stadsbusstrafik i Sverige. De certifieringsdata som finns tillgängliga gäller dock som medeltal för alla tre faserna och, som nämnts, bara för motorn; inte för hela fordonet. Redan här finns således ett avsteg från "verkliga" emissioner. Utan relevanta testdata från chassidynamometer eller från ombordmätningar på fordon finns helt enkelt inte andra data att tillgå än certifieringsdata. I någon mån kommer ändå relativa jämförelser att vara någorlunda rättvisande mellan olika drivmedel och motorer/drivsystem. Exempel på fall där detta inte gäller kommer att lyftas fram och diskuteras senare i rapporten.

6.1.2 Relevant litteratur

Från den litteratursökning som genomförts vill författarna lyfta fram ett antal studier som är mest relevanta för föreliggande studie. Någon komplett genomgång av alla referenser som hittats görs inte. De studier som författarna främst vill framhålla som intressanta är:

- VTT: "Fuel and technology alternatives for buses." [20]
- MJB & A: "Comparison of Modern CNG, Diesel and Diesel Hybrid-Electric Transit Buses: Efficiency & Environmental Performance." [40]
- ACES studien (flera rapporter)

VTT-rapporten

En kort översikt av VTT-rapporten görs i detta avsnitt. För mer data hänvisas läsaren till originalrapporten. Det förtjänar att nämnas att den utvärdering och de överväganden som presenteras nedan är utförd av föreliggande rapports författare¹².

Rapporten från det statliga institutet VTT i Finland är ett samarbete inom IEA avtalet "Advanced Motor Fuels", där flera länder, bland annat Sverige, deltar aktivt. De emissionstester som gjorts inom ramarna för projektet har utförts av VTT själva och av Environment Canada (EC). Testerna av VTT har utförts på europeiska bussar och EC har (självfallet) testat nordamerikanska bussar. Flera av de använda kör cyklerna har lokal/regional anknytning men några gemensamma kör cykler har också använts av båda instituten, dock inte för riktigt alla testade bussar.

Ett antal olika kör cykler användes av VTT och EC vid testerna på chassidynamometer. Flera var gemensamma men några också specifika för Europa, respektive Nordamerika. Några av de mest intressanta kör cyklerna var (med de förkortningar som används i den föreliggande rapporten):

- Man: Kör cykel representativ för Manhattan
- Ademe: En kör cykel representativ för Paris framtiden av Ademe och RATP¹³

¹²¹² Resonemang, slutsatser mm står föreliggande rapports författare således för själva, vilket naturligtvis också betyder att VTT-rapportens författare inte nödvändigtvis delar dessa ståndpunkter.

- UDDS: Urban Dynamometer Driving Cycle, chassidynamometervariant av den amerikanska transienta körcykeln för tunga fordon

Utöver körcyklerna ovan är också Braunschweigcykeln av visst intresse. Orsaken är att det tidigare finns väldigt mycket data genererat i Sverige för bussar i denna körcykel. Tyvärr är det mesta genererat på fordon äldre än Euro VI.

Flera av de bussar som testats på VTT är av äldre årsmodell. De är intressanta som referens och visar utvecklingen men är av mindre intresse i föreliggande studie. Alla bussar som använts som underlag här har motorer som certifierats enligt gränsvärdet EEV (Environmentally Enhanced Vehicle), dvs. i praktiken samma gränser som i Euro V¹⁴. Några Euro VI bussar fanns inte med i studien, vilket hade varit mycket intressant i föreliggande studie men man måste ju också notera att arbetet utfördes för några år sedan och att sådana fordon då förmodligen inte fanns tillgängliga. Resultaten vad gäller emissioner är därför av begränsat intresse för det arbete som görs här men resultaten för bränsleförbrukning är i högsta grad relevanta och har utvärderats. De fordon som vi själva utesluter i utvärderingen är, med korta förklaringar, följande:

- Euro II och Euro III bussar: alltför gamla fordon
- En EEV buss med EGR: *Enbart* EGR används inte i Euro VI utan man förlitar sig främst på SCR katalysator. Även om både EGR och SCR används står SCR för den största andelen av NO_x reduktionen. Ett antal motorer har certifierats för EEV och Euro V med enbart EGR men då fordon med SCR gett lägre bränsleförbrukning har den sistnämnda tekniken dominerat. En EEV/Euro V buss med enbart EGR har knappast en bränsleförbrukning som är representativ för en Euro VI buss.
- Två EEV bussar med SCRT rening (SCR och partikelfilter), där den ena var en "lättnviktsbuss". I båda fallen har inte tester utförts i alla körcykler. Lättnviktsbussen är, per definition, för lätt för att vara representativ för den storlek av svenska bussar som undersöks här.
- Gasbuss med "lean-burn" (mager förbränning). Detta koncept klarar inte framtida avgaskrav och exempelvis NO_x ligger således förhållandevis högt i förhållande till andra bussar och den andra gasbussen som testades på VTT.
- Fordonet (en lastbil) som körs på DME är att betrakta som en prototyp. DME ingår inte heller i vår utvärdering av drivmedel. På längre sikt kan DME vara ett intressant alternativ men inte i en ögonblicksbild av teknikläget som är främsta fokus i denna studie.

¹³ En mer fullständig beteckning vore Ademe-RATP. RATP (Régie Autonome des Transports Parisiens) är RATP är världens 5:e största kollektivtrafikbolag och ansvarar bl. a. för kollektivtrafiken i Paris.

¹⁴ Det gäller alla emissionskomponenter utom HC, som är lägre i EEV än Euro V, men det har oftast ingen praktisk betydelse eftersom dieselmotorer som regel ligger långt under den gränsen i alla fall.

När de ovanstående bussarna sorterats bort kvarstår 7 bussar som de mest intressanta. Data för de fordonen visas i Tabell 8.

Tabell 8. Data för några av bussarna som testats hos VTT

Vehicle code	Fuel type	Engine size (l)	Emission Control	Driveline	Storage type	Test inertia
EEV/SCR	Diesel	7,2 l	SCR	Conventional	n.a.	15 250
Hybr. 1	Diesel	6,7 l	SCR	Parallel hybrid	Battery	14 750
Hybr. 2	Diesel	4,8 l	SCR	Parallel hybrid	Battery	15 080
Hybr. 3	Diesel	6,7 l	SCR	Parallel hybrid	Super caps	15 643
Hybr. 4	Diesel	5,9 l	SCR	Series hybrid	Battery	15 159
CNG SM	Methane	11,9 l	TWC	Conventional	n.a.	15 350
Ethanol	ED95	9,0 l	OC	Conventional	n.a.	15 105

Som framgår av Tabell 8 är spridningen ganska stor vad gäller motorernas cylindervolym. För hybrid nr. 2 har tillverkaren av allt att döma gjort en kraftig nedskalning av motorn (downsizing). Det är möjligt att göra då elmotorn ”stöttar” förbränningsmotorn. Den metandrivna bussen (bet. CNG SM) har en mycket större motor än de andra bussarna. Det påverkar främst bränsleförbrukningen, vilket diskuteras nedan.

Testvikten är tämligen lika för alla bussarna där, något förvånade en hybridbuss är den lättaste och en annan hybridbuss är den tyngsta. Gasbussen är den näst tyngsta bussen. Den har både betydligt större motor än de andra bussarna och belastas även av vikten från tunga gastankar.

Alla dieseldrivna bussarna använder SCR rening men har varken partikelfilter eller EGR. Den metandrivna bussen använder TWC, vilket är det koncept som sedermera också föredras för att klara emissionskraven i Euro VI. Det är, som konstaterades redan kapitel 4, praktiskt taget omöjligt att klara Euro VI med någon annan teknik.

Den tredje hybriderna har ingen växellåda utan startar på elmotorn och kopplar in dieselmotorn i högre hastigheter. Det är tveksamt hur representativt detta koncept är för framtida tunga hybridfordon. En intressant detalj är dock att den bussen använder superkondensatorer och inte kemiska batterier. Man kan konstatera att seriehybriden inte har lika stor nedskalning av motorn som den av parallellhybriderna som drivit nedskalningen längst. Man kunde kanske förvänta sig en betydande nedskalning för just seriehybrider men den motor som används här är inte nämnvärt mindre än de andra motorerna; vilket gäller även för motorer i konventionella bussar.

Av de bussar som testats inom projektet av EC i Kanada är det främst de med motorer som certifierats för EPA 2007 och EPA 2010 som är av intresse. Det fanns också en äldre buss där motorn uppfyller EPA 1998 som testats. Alla bussarna var dieseldrivna och två av dem var

hybrider. Några direkta jämförelser med gasbussar kan därför inte göras men flera av körcyklerna har varit gemensamma mellan testerna på VTT och de på EC, så vissa jämförelser med de två gasbussar som VTT testat skulle i och för sig kunna göras. Data för några av bussarna som testats av EC visas i Tabell 9.

Tabell 9. Data för några av bussarna som testats hos EC

Emission certific.	Engine size (l)	Emission Control	Driveline	Test inertia
EPA 2007	8,9 l	EGR, DPF	Conventional	13 960
EPA 2007	8,9 l	EGR, DPF	Hybrid	15 309
EPA 2007	6,7 l	EGR, DPF	Hybrid	14 866
EPA 2010	8,9 l	DPF, SCR	Conventional	13 835
EPA 2010	8,9 l	DPF, SCR	Conventional	13 835
EPA 2010	8,9 l	DPF, SCR	Conventional	13 523

Intressantast är de bussar som certifierats för EPA 2010. Denna gräns motsvarar ungefärligen Euro VI och dessa bussar är därmed bland de bussar med lägst emissioner som hittats i litteratursökningen. Jämförelsen med EPA 2007 är förstås också intressant i sammanhanget. En av hybridbussarna har en mindre motor än de övriga bussarna, så en nedskalning är uppenbar i det fallet också. Alla de övriga bussarna har en motor på 8,9 liter. Det är, i alla fall för moderna bussar under europeiska förhållanden, en relativt stor motor. I visas i Tabell 9 nämns inte EGR bland "emission control" men man kan förmoda att det också används, liksom på de flesta motorer generellt som uppfyller EPA 2010.

MJB-rapporten

En kort översikt av MJB-rapporten görs i detta avsnitt. För mer data hänvisas läsaren till originalrapporten. Samma resonemang för tolkningen av data och för slutsatser gäller som för VTT rapporten.

I MJB-studien undersöktes 6 olika bussar från två olika busstillverkare. De tre typer av drivmedel/teknik som testades var naturgas, konventionell diesel och dieselhybrid. En översikt av de viktigaste egenskaperna för bussarna visas i Tabell 16.

Tabell 10. Specifikationer för bussar i MJB-studien

Tillverkare	New Flyer of America			Daimler Buses North America		
Plattform	CNG	Diesel	Hybrid	CNG	Diesel	Hybrid
Tjänstevikt	31 201 lb	27 730 lb	27 870 lb	31 610 lb	29 310 lb	29 730 lb
Motor (år, tillverkare och modell)	MÅ 2010 Cummins ISLG 280	MÅ 2011 Cummins ISL9 280	MÅ 2010 Cummins ISB 6,7 280	MÅ 2010 Cummins ISLG 280	MÅ 2011 Cummins ISL 280	MÅ 2010 Cummins ISB 6,7 280
Transmission	Allison B400R	Allison B400R		Allison B400R	ZF Ecolife	BAE HybriDrive

Man kan konstatera att de båda gasdrivna bussarna är tyngre än motsvarande diesalbussar. Det är inte förvånande då gastankar är tunga. Tidigare reflektioner kring storlekar på motorer för de hybridbussar som EC testade stämmer också i det här fallet med den skillnaden att i MJB-studien har *båda* hybridbussarna en mindre motor än motsvarande konventionella diesalbussar (downsizing – igen). Det kan också förklara att skillnaden i vikt mellan konventionella diesalbussar och dieseldrivna hybridbussar är liten.

Bränsleförbrukningen mättes i tre olika körcykler på väg och tre på chassidynamometer medan emissioner bara mättes på chassidynamometer. Då emissionsmätningar saknas i testerna på väg, och eftersom författarna av föreliggande rapport är av uppfattningen att chassidynamometermätningar generellt är mer reproducerbara och exakta, diskuteras enbart chassidynamometermätningarna här. De olika körcyklerna som användes vid testerna på chassidynamometer var (med förkortningar):

- Man: Manhattan
- OCC: Orange County Cycle
- UDDS: Urban Dynamometer Driving Cycle

Medelhastigheten för körcyklerna är i ökande ordning: Man, OCC och UDDS. Antal stopp per km är i motsatt ordning. Det förtjänar att nämnas att Man cykeln är en extremt långsam kör-cykel med väldigt många stopp. Den liknar Ademe körcykeln tämligen väl. Enbart Man kör-cykeln är inte speciellt representativ för körning i svenska städer annat än möjligen i rusnings- trafik när det går väldigt trögt i centrum i någon av de största städerna. För att få mer representativa resultat för bussar i svensk trafik kan man väga samman resultat från flera kör-cyklar.

ACES studien

Diskussionen ovan har främst handlat om reglerade emissioner. Minst lika viktigt är icke reglerade emissioner, eftersom en hel del av hälsoeffekterna från fordonsavgaser kan hänföras till ämnen som inte regleras i dag eller som regleras som summan av en mängd olika ämnen. Som exempel kan nämnas att oförbrända kolväten (HC) regleras som summan av alla ämnen

som detekteras i ett flamjonisationsinstrument. Bland dessa ämnen finns t.ex. föreningar med vitt skilda hälsoeffekter. Vissa har inte några direkta hälsoeffekter alls i låg koncentration, t.ex. metan, medan föreningar som är kända carcinogener eller som är mutagena, t.ex. vissa polycykliska organiska kolväten (PAH), också förekommer. De data som presenteras i föreliggande studie visar klart att nivåerna av reglerade emissioner från nya bussar – oavsett drivmedel – ligger på mycket låga nivåer. Det är dock viktigt att också försöka svara på frågeställningen ifall samma sak gäller även för icke-reglerade föreningar som kan utgöra hälsofara för människa.

Den enligt författarnas mening bästa studien inom det området är den s.k. ACES-studien (Advanced Collaborative Emissions Study) som gjorts i USA. Studien har genomförts i ett samarbete mellan CRC (Coordinating Research Council, Inc.) och HEI (Heath Effects Institute). CRC finansieras av motor- och drivmedelsindustri medan HEI finansieras av EPA och motorindustrin. Amerikanska energidepartementet (DOE) har också bidragit med finansiering till ACES studien. Liksom i så många andra sammanhang har fokus varit på dieselavgaser och något annat drivmedel än dieselolja har inte undersökts.

ACES-studien har pågått i många år med en mängd tjocka publikationer som konkreta resultat. Projektet omfattade 3 faser och slutrapporten från den första fasen publicerades redan 2009 [41]. Den senaste (sista?) rapporten från fas 3 publicerades i januari 2015 [42]. Det ligger utanför ramarna för föreliggande studie att gå igenom och diskutera alla dessa resultat men det kan dock vara av intresse att belysa några generella resultat och slutsatser. Den stora mängden av information kan dock medföra att just det som lyfts fram i föreliggande studie kan bli något subjektivt.

Angående reningsteknik kan nämnas att i fas 1 av ACES-projektet testades fyra motorer med 2007 års teknik och i fas 2 testades likaså fyra motorer men med 2010 års teknik. Alla motorerna kom från de fyra största motorleverantörerna av motorer till tunga fordon i USA. Motorerna testades enligt en speciell 16-timmars testcykel som sägs spegla verkligheten bättre än de testcykler som används vid certifiering.

I Tabell 11 visas ett exempel på de reduktioner som åstadkommits för motorer med 2007-års teknik jämfört med 2004-års teknik. Notera att 2004 hade motorerna oxiderande katalysator men inget partikelfilter. Som framgår av Tabell 11 är reduktionerna påtagliga för alla föreningar. De förhållandevis stora reduktionerna för de fyra sista grupperna av föreningar beror sannolikt på att 2007 motorerna använder DPF.

Tabell 11. Reduktion av icke-reglerade emissioner mellan 2004 och 2007 (%)

Föreningar	Red. (%)
Enkla aromater	82
PAH (di+)	79
Nitro-PAH	81
Alkaner	85
Polära ämnen	81
Hopaner/steraner	99
Karbonyler	98
Inorganiska joner	38
Metaller & element	98
Organiskt kol (OC)	96
Elementärt kol (EC)	99
Dioxiner/furaner ^a	99

^aJämfört med 1998 motor

Tabell 12 kompletterar sammanställningen genom att även jämföra 2010 mot 2007, samt 2010 mot 2004. Reduktionen är närmare 100 % för nästan alla ämnen i det senare fallet men även mellan 2007 och 2010 har avsevärda förbättringar åstadkommit. Exempelvis har PAH (definierat som di+ aromater) och Nitro-PAH minskat med 97 respektive 99 %. Många av dessa föreningar är kända för att vara carcinogena och/eller mutagena och en minskning av den omfattningen (från en redan låg nivå) är naturligtvis väldigt positiv.

En övergripande slutsats är att nivåerna för hälsofarliga icke-reglerade emissioner från 2010-års motorer ofta ligger nära eller under detektionsgränsen för de mätmetoder som finns i dag.

Tabell 12. Reduktion av icke-reglerade emissioner mellan 2004, 2007 och 2010 (%)

Föreningar	2007→2010	2004→2010
Enkla aromater	50	91
PAH (di+)	97	99
Nitro-PAH	99	100
Alkaner	93	99
Polära ämnen	96	99
Hopaner/steraner	89	100
Karbynyler	80	100
Inorganiska joner	87	92
Metaller & element	81	100
Organiskt kol (OC)	36	97
Elementärt kol (EC)	53	100
Dioxiner/furaner ^a	88	100

^aJämfört med 1998 motor

I fas 3 av ACES-studien har exponeringsförsök på råttor gjorts. För dessa experiment valdes en av de tidigare testade 2007-års motorerna. Motorn kördes i 30 månader, 16 timmar dagligen, 5 dagar i veckan. Försöksdjuren exponerades för 3 olika halter av avgaser. Som kontrast till tidigare exponeringar av dieselavgaser (med äldre motorer) fick djuren inga tumörer, förstadier till tumörer eller andra lungförändringar. De enda effekter som observerades fanns i luftrören, de var dessutom milda och kunde noteras bara vid den högsta exponeringsnivån (som f.ö. var väsentligt högre än de nivåer som förekommer i tätorter med dålig luftkvalitet; förf. anm.). Detta stämmer med tidigare observationer på råttor som utsatts

för långvarig exponering av NO₂. Dessa nivåer har som bekant väsentligt reducerats ytterligare för motorer som uppfyller 2010-års EPA krav i förhållande till den motor av 2007 års modell som användes vid djurförsöken.

Författarna till föreliggande rapport vill göra en del reflektioner i det följande. Även om resultat från USA som uppfyller 2007- och 2010-års krav inte nödvändigtvis kan överföras rakt av på europeiska motorer som uppfyller Euro V och VI, torde ungefärligen liknande relativa minskningar av hälsofarliga icke-reglerade emissioner också ha skett för europeiska motorer. Därmed borde även Euro VI motorer ha så pass rena avgaser att många icke-reglerade emissionskomponenter knappt ens kan mätas, att tumörer inte kan påvisas i djurförsök och att inga skador i övrigt i luftvägarna på försöksdjur kan ses annat än vid väldigt höga exponeringsnivåer. Några experimentella data som bekräftar detta finns dock inte (ännu). Det bety-

der inte heller att alla hälsoproblem är lösta för busstrafiken men man är i alla fall på god väg att minska dem till en mycket låg nivå.

6.1.3 Bränsleförbrukning, energianvändning och CO₂

Viktigast i utvärderingen av bränsleförbrukning är att den *relativa skillnaden* mellan kombinationerna av bränsle och drivsystem blir så riktig som möjligt. De körcykler som använts i testerna kanske inte heller är fullt ut representativa för de körmönster som svenska stadsbussar opererar i. Det är naturligtvis ett dilemma som måste hanteras och tyvärr saknas moderna experimentella data för att göra beräkningar som är relevanta för dagens bussar. Ofta finns dock resultat för bränsleförbrukning, energianvändning och CO₂ från ett antal körcykler och därför kan den samlade informationen från dem användas.

En av de första ansatserna gällande bränsleförbrukning var att använda de s.k. SORT körcyklerna som utvecklats av UITP, den internationella organisationen för kollektivtrafik. Dessa körcykler kan t.ex. användas vid upphandling av kollektivtrafik och vid upphandling av bussar. Busstillverkarna brukar tillhandahålla uppgifter på förbrukning i de olika SORT körcyklerna till sina kunder. Dokumentation införskaffades från UITP i syfte att undersöka förutsättningarna för att använda dessa körcykler [43]. SORT cyklerna skulle kunna vara ett utmärkt sätt att jämföra olika typer av bussar och skulle dessutom vara ett komplement till andra data. Tyvärr visade det sig att det fanns få uppgifter från bussbolagen om detta. Några data kunde heller inte erhållas från busstillverkarna. Det kan säkert vara meningsfullt att använda SORT cyklerna för jämförelser av bränsleförbrukningen mellan olika bussar men i det här arbetet visade det sig vara omöjligt att få fram tillräckligt med data.

Som "bas" för alla beräkningar har data från Keolis för bränsleförbrukning för bussar i stadstrafik använts (se kapitel 10). Enligt Keolis uppgifter ligger bränsleförbrukningen för diesel-drivna stadsbussar på **41,8 l/100 km**. Det är vår "referens" i sammanhanget, dvs. den förbrukning som allt annat relateras till.

En körcykel som är gemensam i alla tre studierna som diskuterades ovan är den amerikanska transienta körcykeln för chassidynamometer, UDDS. Den körcykeln är i sig mer representativ för körning utanför de mest tätbefolkade områdena; inte för körning i riktigt tät citytrafik. Ett par andra körcykler som mer representerar körning i tät citytrafik är körcyklerna som ovan benämndes Ademe och Man. Dessa två är ganska snarlika men skiljer sig ändå lite åt. För att få en bränsleförbrukning på ca **42 l/100 km** kan man för en "standarddieselbuss", dvs. EEV bussen med SCR i VTT-rapporten, väga ihop Ademe och UDDS i förhållandet 44:56 (det ger avrundat 41,9 l/100 km). I mätningarna hos VTT har både Ademe och Man körcyklerna använts för fler av fordonen och bland dem även för "standarddieselbussen" i den här studien, dvs. EEV bussen med SCR rening. För att få samma förbrukning med Man/UDDS som Ademe/UDDS krävs ett förhållande på 36:64 i det förstnämnda fallet. Det kan tolkas som att Man körcykeln ger lite högre förbrukning per km än Ademe körcykeln. Den viktade bränsleförbrukningen på ca 42 l/100 km ligger också väldigt nära förbrukningen i Braunschweigcy-

keln som hamnade på 41,3 l/100 km i testerna hos VTT för den nämnda bussen.

Braunschweigcykeln har visat sig vara någorlunda representativ för bussar i svensk stadstrafik, så det är också en kontroll på att den viktning som gjorts med hjälp av de två kombinationerna av körcykler ger rimliga resultat.

Med hjälp av de härledda viktsfaktorerna för körcyklerna kan *relativa skillnader* mellan kombinationer av drivmedel och drivsystem tas fram. I Tabell 13 ges en del exempel på detta för de tre kombinationer som är vanligast i de nämnda studierna, nämligen diesel, gas och dieselhybrid, samt ED95, där vi dock bara har testresultat från en enda buss. För tydlighetens skull har den konventionella dieselbussen använts som referens, dvs. de andra relateras till den (100 %). En högre siffra innebär alltså en högre förbrukning och vice versa för en lägre siffra. Det förtjänar också att nämnas att alla siffror relaterar till en dieselevivalent förbrukning, dvs. hänsyn tas givetvis till att energiinnehållet är olika för olika typer av bränslen.

Tabell 13. Jämförelse av relativ och viktad bränsleförbrukning för olika kombinationer av drivmedel och drivsystem (hybrid eller konventionell)

Drivmedel/ Drivsystem	Relativ bränsleförbrukning i tester (%)		
	MJB	VTT	EC
Diesel	100 %	100 %	100 %
Dieselhybrid	98 %	80 %	76 %
Fordonsgas	127 %	150 %	i.d.
Etanol, ED95	i.d.	115 %	i.d.

Trots intentionen att utvärdera så "rättvist" som möjligt finns stora skillnader mellan en del av resultaten i Tabell 13. Det kan också vara på sin plats att förklara en del av skillnaderna och de värden som författarna slutligen valt för jämförelserna mellan de drivmedel/drivsystem som redovisas senare.

Hybridbussar

Dieselhybriderna i MJB-studien hade som nämnts ovan olika stora motorer. Den mindre motorn är helt klart mer optimal för att erhålla låg bränsleförbrukning. Den viktade förbrukningen för bussen med den mindre motorn ligger på 93 % medan den viktade förbrukningen för bussen med den större motorn ligger på 105 %. Det som ger utslag för den större motorn är att bränsleförbrukningen i UDDS ligger hela 116 % i förhållande till dieselbussen. Det finns inget skäl till att förbrukningen i UDDS ska behöva bli nämnvärt högre för en hybridbuss än för en konventionell buss. Eftersom hastigheter och motorbelastningar ligger mycket högre i UDDS än t.ex. Ademe och Man körcyklerna är det rimligt att UDDS inte är lika *gynnsam* för hybridbussar som de övriga nämnda körcyklerna. I klartext: det finns inte lika mycket att tjäna på hybridisering för fordon som kör utanför tätorten. Likväl finns det skäl att tro att den sämre hybridbussen inte alls är optimerad för ett körmönster som UDDS. Även om po-

tentialen för hybridisering inte är lika hög i UDDS och liknande körcykler är det rimligt att den åtminstone bör ligga någon procentenhet lägre, vilket också ses för hybridbussen med den mindre motorn. Det finns säkert mer att göra här för att förbättra hybridtekniken. Att använda medelvärdet för de båda hybridbussarna i MJB-studien vore därför knappast att skatta den fulla potentialen för hybridisering. Beaktar man alla tester i MJB-studien är det mest fördelaktiga resultatet för den "bästa" hybridbussen i den mest fördelaktiga körcykeln för hybrider, dvs. Man körcykeln, 69 %. Motsvarande siffra för den "sämsta" hybridbussen är 75 % i Man körcykeln. Hela spannet för båda hybridbussarna i alla körcykler ligger alltså mellan 69 och 116 %.

Medeltalet för alla fyra hybridbussarna i VTT testerna ger en relativ förbrukning på 80 %, dvs. redan där ett väsentligt bättre resultat än medel i MJB-rapporten. Den hybridbuss som har en nedskalad motor är bäst och ligger på 72 %. Motsvarande siffra för hybridbussen utan nedskalning, men med konventionell växellåda, ligger på 84 %. Seriehybriden ligger på 82 %. Motorn i det drivsystemet är något nedskalad i förhållande till andra motorer men inte lika mycket som för den nämnda parallellhybriden. En tänkt försäljningsmix på 50:50 mellan de två senast nämnda bussarna skulle exempelvis ge en förbrukning på 77 % av den konventionella dieselbussen, dvs. en reduktion med 23 % i förhållande till en konventionell dieselbuss. Hybriden utan växellåda torde knappast vara representativ för framtida hybridsystem, så den bussen kan man bortse ifrån.

Gasbussar

Motorerna till såväl gas- som dieselbussar i MJB-rapporten är lika stora och dessutom av samma fabrikat (Cummins 8,9 liter). Med hänvisning till resonemanget i teknikkapitlet (4.4) och tidigare i detta kapitel ger således motorerna i MJB-studien den kanske mest relevanta jämförelsen mellan bussar som drivs av gas- respektive dieselmotorer med avseende på bränsleförbrukning. I medeltal låg gasbussarna på 127 % bränsleförbrukning i förhållande till dieselbussarna men spridningen var stor för respektive busstyp (112-142 %). Det ligger utanför ramarna för denna studie att försöka ta reda på vad denna stora skillnad beror på men en faktor kan noteras. Den ena busstypen (Daimler) hade inte samma växellåda för gas- respektive dieselmotorn. För denna busstyp var skillnaden mindre än för bussarna som hade samma växellåda. I MAN körcykeln var skillnaden tämligen lika för båda busstyperna medan den var betydligt större i UDDS körcykeln. Det antyder att växellåda och/eller slutväxel kan påverka utfallet. Eftersom jämförelsen där bussarna hade samma växellåda torde vara mest relevant skulle det tala för att en något större skillnad än den faktor på 127 % som var medel för båda busstyperna vore en mer relevant siffra i en helt teknikneutral jämförelse.

Nivån för gasbussen i VTT:s tester låg på 150 % i förhållande till en konventionell dieselbuss. Det är väldigt mycket och i sammanhanget också mer än den ökning på ca 25-30 % som brukar nämnas i litteraturen (och som kunde noteras i MJB-studien). Det finns två förklaringar till den höga förbrukningen för gasbussen i det här fallet. Dels är detta en motor med stö-

kiometrisk förbränning ($\lambda=1$) och trevägskatalysator, dels är motorn betydligt större än dieselmotorerna i de konventionella dieselbussarna. Det fanns, som nämnts ovan, även en buss med mager förbränning med i VTT:s tester som gav lägre förbrukning (120 %). Den tekniken är som nämnts inte längre aktuell för motorer med höga avgaskrav. Tyvärr ger stökiometrisk förbränning och trevägskatalysator högre förbrukning än den teknik som tidigare var förhärskande. Att klara av det andra problemet (motorstorleken) handlar om att öka det specifika effektuttaget. I just det här specifika fallet skiljer det nästan en faktor två i cylindervolym mellan gasmotor och dieselmotor. Det är allmänt känt att effektuttaget kan ökas även för motorer med stökiometrisk förbränning och sådana motorer som också klarar Euro VI kraven finns redan i produktion [25]. Det finns därför goda skäl att välja en lägre siffra än 150 %.

Etanolbussen

Bussen med etanolmotor ligger på 115 % i förhållande till den konventionella dieselbussen. På samma sätt som i flera av fallen ovan ligger här en del av förklaringen i den förhållandevis stora motorn (9 liter) jämfört med motorerna i de andra konventionella bussarna.

Valda värden för bränsleförbrukning

Eftersom det inte är helt relevant att bara använda medelvärden för drivmedel och drivsystem för alla tester ovan måste en mer "ingenjörsmässig" bedömning göras i respektive fall. Med de överväganden och diskussion som redovisats ovan har författarna kommit fram till de värden som visas i Tabell 14.

Tabell 14. Valda data för olika kombinationer av drivmedel och drivsystem

Drivmedel/ drivsystem	Relativ bränsleförbr.
Diesel	100 %
Dieselhybrid	75 %
Fordonsgas	125 %
Etanol, ED95	100 %

För dieselhybriden i Tabell 14 har en minskning av bränsleförbrukningen med 25 % valts (75 %). Det är en relativt konservativ siffra i förhållande till de bästa resultaten ovan men bättre än de sämsta resultaten.

För fordonsgas har en skillnad på 25 % också valts men i detta fall är det en ökning av förbrukningen med 25 %. Som diskuterats ovan låg VTT:s resultat för bussen som drevs med en motor med trevägskatalysator på 150 %. Den motorn var dock väsentligt mycket större än andra motorer och av de skäl som anförts ovan borde bästa tillgängliga teknik kunna minska förbrukningen avsevärt. Intervallet torde vara från 120 % till 130 %. I MJB-studien erhöles en siffra på 127 %. I den här studien har 125 % valts.

Det mycket höga kompressionsförhållandet i dagens typ av etanolmotor begränsar det specifika effektuttaget och motorn måste därför ha större cylindervolym än en motsvarande motor för dieselolja som bränsle. Enligt resonemanget i kapitel 4 (avsnitt 4.4.4) ligger också kompressionsförhållandet över det optimala för dieselprocessen. Scania anger att etanolbussen (se avsnitt 10.2.2) har samma bränsleförbrukning som motsvarande buss med dieselmotor. Det kan möjligen vara fallet ifall motorerna i båda bussarna är lika stora. Detta illustrerar lite av problematiken att jämföra olika tekniker och drivmedel. Data från de praktiska tester som utförts på VTT gav vid vår viktning av resultaten ett värde på 115 %, dvs. 15 % högre förbrukning. Den siffra på 100 % som ändå valts illustrerar det faktum att författarna anser att det finns en teknisk potential att minska bränsleförbrukningen till ungefär samma nivå som för dieselolja. Liksom för gasbussen finns här ett stänk av positiv särbehandling vad gäller de värden som valts.

För eldrivna bussar finns som nämnts ovan inga relevanta värden för energianvändningen. Detta gäller också laddhybrider. TTW verkningsgraden för den el som används kan förväntas vara ungefärligen lika i båda fallen, möjligen något lägre för laddhybriden ifall den är lättare än elbussen. Detta under förutsättning att båda busstyperna har samma prestanda, dvs. att drivsystemet skalats för samma prestanda. I tidningen Ny Teknik, anges att bussen med laddhybrid går 7-8 km på en laddning [44]. Batterikapaciteten anges till 19 kWh. I en senare artikel anges körsträckan till ca 7 km [45]. Även här anges batterikapaciteten till 19 kWh men inte i något fall anges ifall detta är den totala kapaciteten, ifall det är den kapacitet som kan utnyttjas eller ifall det är den mängd el som levererats från nätet. Ett batteri kan inte laddas ur helt utan att det har (allvarliga) konsekvenser för livslängden. Antar man 7,5 km och att hela 19 kWh används skulle bussen förbruka 2,53 kWh/km. Förutsätter man att t.ex. 80 % av batteriets kapacitet utnyttjas skulle förbrukningen bli 2,03 kWh/km. Ifall det för dieselbussen går åt 1,47 kWh arbete genererat vid vevaxeln per km (se nedan) och man förutsätter samma för laddhybriden (man kan beakta att laddhybriden är tyngre men återvinner en del av bromsenergin) skulle de motsvarande verkningsgraderna för det elektriska drivsystemet bli 58,2 respektive 72,8 %. Detta förstås under förutsättning att körcykeln är liknande och att förlusterna i den mekaniska växellådan respektive reduktionsväxeln till elmotorn är lika stora. Så är det förstås inte men det här är bara ett räkneexempel. Vår "referensbuss" har en dieselförbrukning på 41,8 l/100 km. Det motsvarar 4,1 kWh per km. I det fallet antogs, med stöd från simuleringar i litteraturen, en medelverkningsgrad på 36 %. Alla nämnda siffror är grova men skulle antyda att laddhybriden är en faktor 1,6-2 gånger mer effektiv. Detta skulle vara i ett TTW perspektiv. För laddhybriden tillkommer det faktum att laddningen är förknippad med förluster medan en tankning av flytande bränsle är praktiskt taget förlustfri samt att distributionen av el också ger väsentligt mer förluster än distributionen av flytande bränsle. De nämnda förlusterna ingår inte i TTW utan finns i stället med i WTT. Något fog för att en laddhybrid, eller en eldriven buss för den delen, skulle vara 5-10 gånger mer effektiv än en konventionell buss finns inte.

Framställs elen från brännolja via gasturbin, som t.ex. spetskraft, får man räkna med att verkningsgraden för elgenerering och distribution inte överstiger 30 %. I det fallet skulle både laddhybridbussen och elbussen förbruka mer brännolja än dieselbussen (man kan t.ex. multiplicera värdena ovan med en faktor 3). Tänker man sig ett modernt kraftverk som drivs med gas i kombi-cykel och där spillvärme tas tillvara delar av året kan man förstås få mycket bättre utbyte på el som genereras från fossil resurs på detta sätt. Räknar man på klimatgaser för nordisk elmix blir emellertid både laddhybridbussen och elbussen mycket bättre än dieselbussen ur klimatsynpunkt. Exempelen visar dock att de resultat man kan få fram i en komplett WTW beräkning till stor del beror på vilka förutsättningar som väljs.

I BTH-rapporten hänvisas till simuleringar från Volvo Technology Co. men de resultaten finns av sekretessskäl inte publicerade i bilaga 2 till den nämnda rapporten [2]. Data för energianvändningen anges inte heller explicit men digitaliserar man diagram 3.1 i rapporten ser man att energianvändningen ligger på ca 1,5 kWh/km. Det är ungefär samma siffra som med ett konventionellt drivsystem som i vårt fall skulle ha 100 % medelverkningsgrad; dock med viss osäkerhet kring regenerativ bromsning (positivt) och ökad vikt för batteribussen (negativt). En så hög verkningsgrad är förstås omöjlig, vilket borde betyda att det finns skillnader, t.ex. att det är fråga om en annan kör-cykel än den som använts i den här rapporten. Den kör-cykeln skulle då ha en lägre energianvändning per km, dvs. den är *mindre "krävande"* än den som förutsatt i den här studien. Förbrukningen för en dieselbuss ligger i BTH-rapporten högre än för vår referensbuss, dvs. det skulle antyda en *mer "krävande"* kör-cykel. Detta illustrerar nödvändigheten av validerade data och att jämförelser inte görs mellan äpplen och päron. Tyvärr har vi för tillfället inte tillgång till sådana data utan kan bara göra överlagsmässiga beräkningar av ovannämnda slag.

Sammanfattningsvis kan konstateras att relativ bränsleförbrukning för representativa dieselhybridbussar, gasbussar och etanolbussar i någon mån kan uppskattas. För laddhybrider och elbussar finns bara några grova uppgifter som av allt att döma kommer från en tillverkare och där man inte riktigt vet under vilka förhållanden dessa data genererats. Det är inte meningsfullt att "blanda" resultat där det finns ett någorlunda gediget underlag med data som inte är lika säkra och därför redovisas inte resultat för laddhybrider och eldrivna bussar tillsammans med data för andra bussar i våra diagram och tabeller.

6.1.4 Emissioner

Emissionsgränsvärdena får väl anses allmänt kända med en översikt av gränser från Euro III-VI redovisas ändå i Tabell 15.

Tabell 15. Emissionsvärden i transienta körcykler i EU

Gräns/ Euroklass	Emissionsgränser							
	Test- cykel	CO (mg/kWh)	NMHC (mg/kWh)	CH ₄ ^a (mg/kWh)	NO _x (mg/kWh)	NH ₃ (ppm)	PM ^b (mg/kWh)	PN ^c (#/kWh)
Euro III	ETC	5 450	780	1 600	5 000	-	160	-
Euro IV	ETC	4 000	550	1 100	3 500	-	30	-
Euro V	ETC	4 000	550	1 100	2 000	-	30	-
Euro VI	WHTC	4 000	160	500	460	10	10	6E+10

Anmärkningar:

- a) Enbart för gasdrivna motorer (Euro III-V: enbart CNG; Euro VI: CNG & LPG)
- b) Inte applicerbart på gasmotorer från Euro III-IV
- c) För dieseldrivna motorer. PN gränsvärde för motorer med gnisttändning har inte fastställts än.

Som framgår av data i Tabell 15 har en väsentlig skärpning av gränsvärdena gjorts i Euro VI i förhållande till tidigare värden. CO emissioner är egentligen inget problem för dieseldrivna tunga motorer men kan vara det för motorer med gnisttändning och gränsen är kanske satt därefter. Faktiska nivåer brukar ligga långt under gränsen. För NMHC (och THC) samt metan har gränserna från Euro III till Euro VI skärps med faktorer på ca 5 respektive ca 3. Mest anmärkningsvärt är skärpningen av NO_x med mer än en tiopotens och en faktor 16 för massan av partikelemissionerna (PM). Antal partiklar (PN) har inte reglerats före Euro VI men denna gräns är de facto styrande vad gäller partikelemissioner, vilket i praktiken innebär att gränsen för PM är redundant.

I Tabell 16 har certifieringsdata för de busstyper som varit av intresse i denna studie sammanställts. Det är data för reglerade emissionskomponenter och buller. Data härrör från olika källor och är tyvärr inte kompletta, då uppgifter väldigt ofta saknas. Där data för fler motorer har funnits har medelvärden använts. Ingen viktning (exv. försäljningsviktning) har använts för medelvärden. Värden inom parentes anger författarnas uppskattningar.

Tabell 16. Certifieringsdata för bussar

Bränsle/ gräns	CO mg/kWh	NMHC mg/kWh	CH ₄ mg/kWh	NO _x mg/kWh	NH ₃ (ppm)	PM mg/kWh	PN #/kWh	Buller (dBA) körning / tomgång	
Diesel	80	25	-	320	-	2,8	2,0E+10	76	87
Hyb-P	31	0	0	358	0,1	3,5	2,0E+10	74	88
Hyb-S	10	0,5	0	448	-	1,5	2,0E+10	77	86
Gas	415	-	230	320	-	(9)	(-)	77	84
Etanol	(200)	(50)	0	(320)	-	(4)	5,0E+10	(76)	(87)
El	-	-	-	-	-	-	-	66	-
Euro VI	4 000	160	500	460	10	10	6,0E+11	80	

Ett antal kommentarer till värdena i Tabell 16 vara på sin plats. Detta summeras för respektive emissionskomponent. Buller behandlas särskilt i kapitel 8 och kommenteras inte mer här. Notera att buller inte ingår i Euro VI utan definieras i ett särskilt direktiv men har ändå inkluderats i den raden av rent typografiska skäl.

CO emissioner

Som framgår av tabellen ligger CO emissionerna från alla motorer långt under gränsvärdet. Lägst ligger de båda hybridmotorerna och högst ligger gasmotorn. Normalt brukar etanol-drivna motorer ligga något högre än dieseldrivna motorer och en högre nivå för etanol har därför förutsatts här i förhållande till den konventionella dieselmotorn. Någon orsak till att en dieselmotor som normalt sitter i ett hybridsystem men som certifieras som en fristående motor ska ha lägre CO emissioner finns inte utan skillnaderna mellan de tre motorerna som drivs med dieselolja ska nog snarare ses som normal spridning.

NMHC/THC och CH₄ emissioner

Alla NMHC/THC emissioner ligger liksom CO långt under gränsvärdet; mycket nära noll i en del fall. Det är svårt att mäta så nära detektionsgränsen som det handlar om i en del fall. Gasmotorn har högre mängd oförbränd metan än totalt NMHC/THC för övriga motorer. Liksom för CO förväntas etanol även ge högre NMHC emissioner. Samma slutsats som för CO gäller även för NMHC/THC i hybridfallet.

NO_x emissioner

Den ena hybridmotorn har certifierats väldigt nära gränsvärdet. Det har knappast någonting att göra med att den sitter i ett hybridsystem utan är snarare en fråga om spridning mellan motorer. Övriga motorer är ganska lika och har en större marginal. Samma nivå har förutsatts även för etanol. Alternativa drivmedel och biodrivmedel har ingen egentlig fördel i form av lägre NO_x emissioner längre; något som ofta var fallet före Euro VI.

Även om NO_x emissionerna är någorlunda lika för alla drivmedel och, oavsett om hybridisering används eller ej, också är lika har det stor betydelse vilken körcykel som används vid jämförelserna. Resultaten i både VTT och MJB studierna visar att motorer med SCR har förhållandevis högre emissioner i körcykler med låg hastighet. Samma relativa försämring finns inte för exempelvis gasbussar. Temperaturen i SCR katalysatorn blir i sådana körcykler för låg för att reduktionen ska fungera. Det förtjänar dock att nämnas att ingen av bussarna i nämnda studie uppfyllde Euro VI. Det finns alltså inga resultat för Euro VI bussar som skulle kunna verifiera denna hypotes. Bussarna i MJB-studien uppfyllde US 2010 emissionskraven och är väl de som var närmast Euro VI. De indikationer som finns visar att *gasdrivna bussar används bäst ur NO_x synpunkt om de körs i stadskärnan i en stor stad*, där trafiken är mycket långsam och där SCR katalysatorn i en dieseldriven buss kanske inte fungerar optimalt. *Hybridisering skulle också kunna vara ett sätt att minska NO_x emissionerna under liknande körförhållanden*. Detta under förutsättning att hybridiseringen gör att medeltemperaturen i SCR katalysatorn kan ökas och därmed ger bättre NO_x rening. Generellt förtjänar optimal an-

vändning av såväl alternativa drivmedel som hybridfordon att undersökas vidare. Detta ligger utanför ramarna för denna studie men författarna har ändå påpekat sådana omständigheter på ett flertal ställen i rapporten.

NH₃ emissioner

Gräns för ammoniak infördes i och med Euro VI. SCR katalysatorer kan ha ett "slip" av ammoniak, vilket kan öka vid överdosering eller dålig doseringsstrategi. Därför har också motorer med SCR en katalysator för att minska detta slip. Dock saknas data för de flesta (alla utom en!) certifierade motorerna i studien. Normalt brukar ammoniak kunna ligga långt under gränsvärdet och även långt under den nivå där människan reagerar på halten.

Partikelmassa (PM)

Gränsvärdet för partikelmassa är normalt redundant, då gränsen för antal partiklar styr utformningen av partikelfiltret. Ofta ligger värdena på något enstaka mg/kWh. Resultatet styrs ofta också av hur "ren" bakgrund och spädtunneln är, d.v.s. av vilken motor som testades innan den aktuella motorn. Man ska därför inte säga att t.ex. en faktor 2 är en verklig skillnad mellan två motorer. Att de två hybriderna uppvisar det lägsta respektive det högsta värdet av alla dieseldrivna motorer är förmodligen en ren tillfällighet.

PM värdet för gas härrör från VTT rapporten då certifieringsdata saknas. Omräkning till g/kWh har gjorts enligt tidigare nämnda metod. Nivån är en faktor 3-6 högre än för de olika dieselmotorerna. I det här fallet kan man kanske säga att just den motorn skiljer sig signifikant från de andra motorerna, dvs. att gasbussar har högre PM emissioner. Som referens kan nämnas att även den andra gasbussen (med mager förbränning) som testades hos VTT hade exakt samma nivå av PM emissioner. Därför är nog den här nivån representativ för gasdrivna motorer. PM mättes inte i MJB-rapporten för just de två gasmotorer som fanns med i studien så där saknas mätvärden från relevanta moderna gasmotorer. Det visar återigen att man inte enbart ska följa det som krävs i bestämmelserna (US 2010 i det här fallet) i en undersökande studie. Det krävs inte mer arbete för att mäta PM på en gasmotor än på en dieselmotor och mätningen sker ju simultant med alla andra mätningar. Några data från tillverkare av gasmotorer har inte erhållits.

Ett "EPF" måste förutsättas för en etanolmotor som ska klara Euro VI. Det torde behöva utformas annorlunda än ett DPF, förmodligen liknande de GPF som nu kommit i produktion för bensinbilar och som sannolikt införs på en mängd andra bilar framöver. De lägre sotnivåer som en etanolmotor har jämfört med en dieselmotor (före filtret) kommer att medföra att det tar lägre att åstadkomma en "filterkaka" på filtret och nivåerna i avgasröret kommer att vara förhöjda innan dess. Det är i huvudsak filterkakan som står för det mesta av filtreringen. Detta måste kompenseras med t.ex. annan washcoat eller annan typ av beläggning för att öka filtreringsgraden i ett EPF. Författarna förutser att detta går att åstadkomma och att en PM nivå med betryggande marginal till gränsvärdet kan nås; om än möjligen något högre än för dieselmotorer (av nämnda skäl).

Antal partiklar (PN)

Dieselmotorer certifieras oftast med god marginal till PN gränsvärdet. I de fall som ses i Tabell 17 är det fråga om en faktor 30. Det är en hög faktor och då bör man också betänka att denna mätmetod är behäftad med mindre artefakter än motsvarande metod för mätning av PM. Vi förutsätter att gas- respektive etanolmotorer kommer att ligga lite högre även om en nivå uppskattats bara i det sistnämnda fallet.

Omräkning från g/kWh till g/km

För att räkna om emissioner från g/kWh till g/km krävs data på hur många kWh som används vid körning i ett representativt körmönster. Det skulle med andra ord krävas mätningar direkt på vevaxeln för att veta hur mycket arbete motorn uträttar. Sådana direkta mätningar är ytterst sällsynta och är dessutom svåra att utföra. Ett enklare sätt är att använda specifik bränsleförbrukning i körcykeln, alternativt medelverkningsgrad, och motsvarande bränsleförbrukning i den ”verkliga” körningen. På så sätt får man en omräkningsfaktor mellan g/kWh och g/km, dvs. hur många kWh som motorn genererar per km. Sådana data finns från simuleringar av bussar och lastbilar i en tidigare studie av en av denna rapports författare [23]. Dessa resultat finns inte specifikt publicerade i rapporten men ingår i de data som genererades vid simuleringarna. Ett urval av data för en dieseldriven buss respektive en dieseldriven lastbil är:

- Buss, Braunschweiggörkykeln: 36,3 %
- Buss, ETC körkykeln: 36,3 %
- Lastbil, fullastad, ETC körkykeln: 38,3 %
- Lastbil, tom, ETC körkykeln: 37,0 %
- Lastbil, fullastad, WHVC körkykeln: 36,3 %
- Lastbil, tom, WHVC körkykeln: 34,3 %
- Lastbil, fullastad, WHVC körkykeln, del 3: 39,9 %
- Lastbil, tom, WHVC körkykeln, del 3: 38,5 %

Som förklaring till punkterna sist på listan kan nämnas att simuleringar gjordes för lastbilen i den sista delen av WHVC körkykeln, dvs. landsvägskörningen. Dessa data är inte relevanta i denna studie men visas som exempel. Medelverkningsgraden för motorn i en fullastad lastbil kan under sådana förhållanden närma sig 40 %. Det är en *mycket hög siffra*. I runda slängar är siffran dubbelt så hög som medelverkningsgraden för motorn i en personbil, vilket diskuteras tidigare i rapporten. I stadskörning blir verkningsgraden, som framgår av punktlistan, betydligt lägre. Lägst (34,3 %) är medelverkningsgraden för en tom lastbil i WHVC körkykeln. En så låg siffra är knappast representativ för en buss eftersom motorn i den tomma lastbilen går på låg belastning på grund av låg fordonsvikt i förhållande till motorstyrkan. I extrema stadskörningscykler kommer medelverkningsgraden resonansmässigt att vara lägre än de siffror som nämns ovan. Simuleringar i någon sådan körcykel fanns dock inte i den nämnda referensen [23]. Som kompromiss har en **medelverkningsgrad på 36 %** valts i den

här studien. Med data från SPBI för miljöklass 1 diesel och den tidigare nämnda förbrukningen på **41,8 l/100 km** får man då fram att motorn i en dieselbuss genererar: **1,475 kWh/km**. Det blir också omräkningsfaktorn från g/kWh till g/km för emissionerna. Självfallet är denna faktor behäftad med en del osäkerheter. Något bättre sätt att få fram faktorn har dock inte författarna hittat. Samma faktor har använts för alla bussar men en diskussion om detta görs nedan.

Det finns ett par faktorer, utöver de generella osäkerheterna som finns för faktorn ovan, som borde beaktas för alternativa drivmedel och hybrider. En sådan är inverkan av luftmotstånd. En del av alternativen har t.ex. tankar eller batterier på taket, vilket säkert påverkar luftmotståndet (av mindre betydelse i tät citytrafik). En annan faktor är att bussarnas vikt kan påverkas. I en del fall påverkas totalvikten också så mycket att maximalt antal passagerare måste sänkas. Om detta inte är fallet kan ändå medelvikten påverkas, t.ex. genom tunga tankar eller batterier, eller genom att motor och annat i drivsystemet kanske blir tyngre än för referensbussen. Ofta kan det vara så att busstillverkaren har några få motorstorlekar att välja mellan och att storlek och effektuttag därmed inte blir optimalt för låg bränsleförbrukning. De studier på bussar som diskuterades ovan ger för lite statistiskt underlag för att ta fram data för vikter. De indikationer man kan få är dock att t.ex. gasbussar är tyngre än konventionella dieselbussar. Detsamma gäller även för hybrider även om en nedskalning av motorn här delvis kan kompensera för den ökade vikten för batterierna. En annan möjlighet är att beakta detta teoretiskt, dvs. att ta fram "ideala" motorstorlekar i respektive fall för att klara de prestandakrav som finns. I den tidigare nämnda referensen med simuleringar har just detta gjorts [23]. Som förklaring till den högre vikten för etanolbussen i förhållande till dieselbussen beror på att specifik effekt och specifikt vridmoment är lägre för etanolmotorn och det måste kompenseras med en större motor som väger mer. Den gasdrivna bussen med högre specifikt effekt- och vridmomentuttag hade i det här fallet mager förbränning (lean burn) men indikationen om högre vikt är ändå relevant. Möjligen skulle en buss med TWC-motor bli ännu något tyngre.

En högre vikt påverkar bränsleförbrukningen på flera sätt. Dels ökar rullmotståndet i direkt proportion till vikten, dels ökar bussens massa, vilket kräver mer arbete vid accelerationerna. En högre vikt kräver också en uppskalning av motor och drivsystem för att bibehålla prestandan, vilket i sig ytterligare ökar vikten något – den omtalade viktsspiralen, alltså. Till tomvikten för bussen bör man också lägga vikten av passagerarna. I medeltal är beläggningen under dygnet faktiskt ganska låg, i storleksordningen 15 personer. Luftmotståndet är en ganska liten del av färdmotståndet för en buss och är möjligen något högre för en gasbuss med tankar på taket än för de övriga bussarna. En enkel ansats vore därför att energianvändningen påverkas ungefär i proportion till vikten. När mer energi används genereras normalt också mer emissioner, exempelvis när en motor skalas upp för att kompensera för en högre vikt. Certifieringen av motorn tar inte hänsyn till detta eftersom det, per definition, är bara motorn som certifieras. I relativa tal skulle de handla om 3 % för etanolbussen och

drygt 4 % för gasbussen i exemplet ovan, där vikten av förare och 15 passagerare antagits till 1 125 kg. Någon hänsyn till olika vikt för bussarna har inte tagits vid omräkningen av emissionsdata från g/kWh till g/km, utan samma faktor som nämnts ovan har använts till alla bussar. Det förtjänar också att nämnas att andra osäkerheter kan vara minst lika stora när det gäller emissioner. Den kanske viktigaste faktorn är att olika körcykler kan påverka enskilda emissionskomponenter mycket mer. Som diskuterats tidigare kan man dock inte ta hänsyn till detta utan experimentella data från relevanta körcykler.

Inverkan av hybridisering av drivsystemet på emissioner har diskuterats på flera andra ställen i denna rapport. Att motorn använder 25 % mindre bränsle betyder inte automatiskt att emissionerna skulle minska i samma omfattning. Vid samma vikt på bussen krävs samma mängd genererat arbete på vevaxel minus det man får "gratis" genom regenerativ bromsning. Regenerativ bromsning torde vara mindre än hälften av nämnda 25 %. Är bussen tyngre krävs proportionellt ungefär nästa lika mycket *mer* arbete som ökning av vikten. Andra parametrar som påverkar hur motor och avgasefterbehandling fungerar har sannolikt mycket större betydelse. Testerna på bussarna som diskuterats ovan ger också både högre respektive lägre emissionsvärden än för motsvarande konventionella dieslbussar. Författarna har därför valt att inte göra några korrekationer för emissioner från hybridbussar baserat på skillnader i bränsleförbrukning eller verkningsgrad.

I Tabell 17 har emissionsdata räknats om från g/kWh till g/km med omräkningsfaktorn som nämnts ovan. Emissionsdata av den här typen benämns oftast **emissionsfaktorer**.

Tabell 17. Emissionsfaktorer för bussar

Bränsle/ hybrid	CO mg/km	NMHC mg/km	CH ₄ mg/km	NO _x mg/km	PM mg/km	PN #/km
Diesel	118	37	0	472	4,1	2,9E+10
Hybrid	30	0	0	594	3,7	2,9E+10
Gas	612	192	339	472	(13,3)	i,d,
Etanol	(295)	(74)	(0)	(472)	(5,9)	(7,4E+10)

Då det i Tabell 16 fanns data för två olika hybridbussar har medelvärden använts för dessa båda i beräkningen av emissionsfaktorer för den enda "hybrid" som redovisas i Tabell 17. Orsaken till detta förfaringssätt är att de skillnader som fanns mellan motorerna som använts i hybridsystemen inte kan tillskrivas själva hybridsystemen utan härrör från egenskaper som bestäms av motorn själv och dess reningssystem. Det är bättre att ta ett medelvärde än att redovisa separata värden och därmed kanske förleda någon att tro att skillnaderna kan hänföras till hybridisering som sådan och/eller till skillnader i hybridsystemen.

Emissionsfaktorerna i Tabell 17 har använts för att beräkna miljökostnader och livscykelkostnader.

7 LIVSCYKELANALYS (LCA)

Vilken klimatnytta (minskade CO₂-emissioner) olika biodrivmedel leder till beror givetvis till stor del på hur det aktuella bränslet har producerats. I detta arbete använder vi data i form av nyckeltal från Statens Energimyndighet. (Verkliga LCA-värden kan alltså både vara bättre och sämre än de data som används i denna studie). Dessa värden ska ses som ett sorts medelvärde för de biobränslen som används i Sverige. Utsläppsminskningen som presenteras gäller först till och med fordonets tank – WTT (Well to Tank) och senare redovisas värden där man även tar hänsyn till fordonets verkningsgrad och då brukar man prata om WTW (Well to Wheel).

Genom EU:s förnybarhetsdirektiv har hållbarhetskriterier införts i syfte att förhindra negativ inverkan på miljön till följd av en ökad användning av biodrivmedel och flytande biobränslen. I Sverige har hållbarhetskraven implementerats genom lag (2010:598) om hållbarhetskriterier för biodrivmedel och flytande biobränslen (hållbarhetslagen). Energimyndigheten har varit ansvarig myndighet för genomförandet av systemet i Sverige och idag är myndighetens huvudsakliga roll att utöva tillsyn enligt hållbarhetslagen. Rapporteringsskyldiga företag ska årligen rapportera hållbara mängder biodrivmedel och flytande biobränslen. De värden som redovisas i detta kapitel är hämtade från Energimyndighetens rapport [46].

Tabell 18. Utsläppsminskningar jämfört med diesel för olika biobränslen WTT. I denna rapport's beräkningar används de nyckeltal som anges av Statens Energimyndighet, den vänstra kolumnen. [WTT-data är beräknade till producentens "grind". Detta gör att distributionen inte är medräknad. Vår bedömning är att detta steg i sammanhanget är försumbart och vi har därför inte tagit hänsyn till det.]

Drivmedel	Utsläppsminskning Energimyndigheten	Maximal utsläppsminskning Tillverkarnas uppgifter
Diesel	0	
Biogas (gas)	73,0 %	93 % ¹
Etanol	65,8 %	90 % ² 70 % ³
FAME	43,1 %	60 % ⁴
HVO	81,0 %	89 % ⁵
El (nordisk elmix)	87,5 g/kWh ⁶	

Anmärkningar

1. Naturvårdsverket anger att klimatnyttan med biogas är 93 % och att man i bästa fall kan man nå 180 %. Detta då man gör biogas av gödsel och på så sätt minskar läckaget av metan från gödslet.
2. Agroetanol har nyligen lanserat ett etanolbränsle för tunga fordon. Bränslet tillverkas från svenskt spannmål i deras Norrköpingsfabrik och klimatnyttan är ca 90 % och har produktnamnet Agro Clean-power 95

3. Sekab anger att deras ED95 medför att utsläppen av fossil koldioxid kan minskas med hela 70 procent. <http://www.sekab.se/biodrivmedel/ed95/>.
4. Perstorp marknadsför två olika sorters biodiesel [FAME] där den ena anges ge en utsläppsminskning på minst 55 % och den andra på minst 60 %. <https://www.perstorp.com/en/Products/Fuels/Fuels>
5. Enligt Statens Energimyndighet om HVO produceras av rester från pappers- och massaindustrin
6. För el används enheten g/kWh. Som jämförelse kan nämnas att Svensk elmix ligger på 15-20 g CO₂/kWh och den europeiska mixen ligger på ca 450 g/kWh

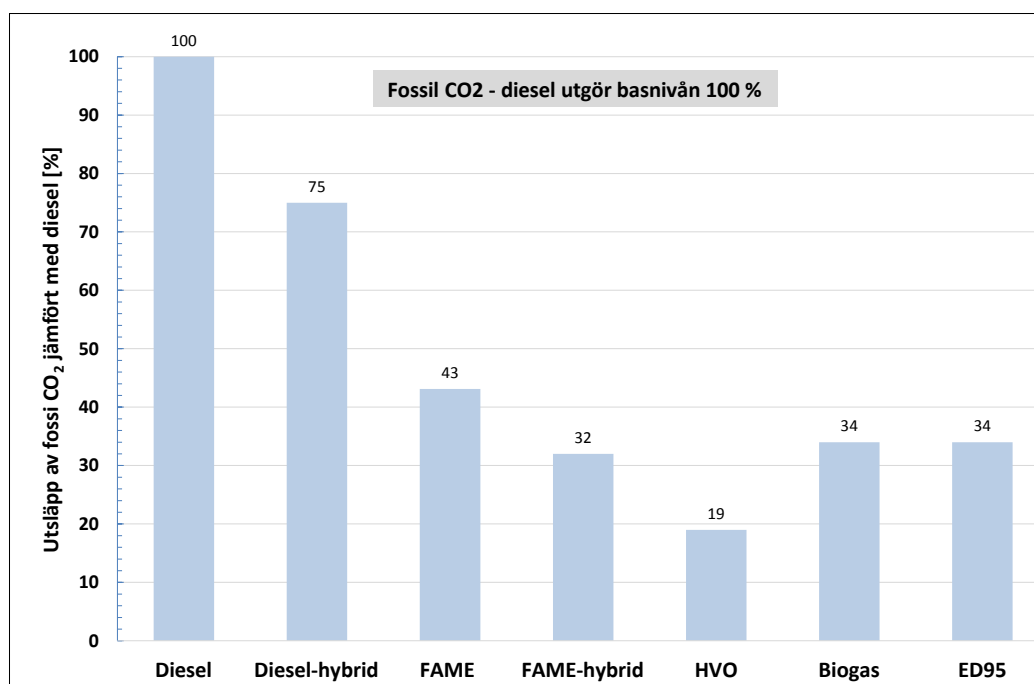
I Energimyndighetens redovisning visas nyckeltal för olika biodrivmedel baserat på 2013 års rapportering. Både faktiska beräkningar och normalvärden har använts i myndighetens beräkning. I den högra kolumnen redovisas utsläppsminskningen enligt olika tillverkares uppgifter och kan läsas som en slags maximal klimatnytta.

Elmix är också ett begrepp som behöver förklaras. Elproduktionen består av en mängd olika kraftslag som var och en har sin specifika emissionsfaktor. Som köpare av el vet man i regel inte vilket ursprung elen har. Skulle den komma från vatten-, eller elkraft är utsläppen så gott som obefintliga, medan kolkondenskraft har betydande utsläpp av koldioxid. Elmixen beskriver ett slags genomsnitt av den el som produceras, men detta genomsnitt är även beroende av rådande förhållande som varierar år från år. Därför anger Statens Energimyndighet ett spann för nordisk elmix som är 75-100 g/kWh och för svensk elmix är spannet 15-25 g/kWh. I beräkningarna kommer värdena 87,5 respektive 20 g/kWh att användas (mitt i spannet).

Tabell 19. Nordisk elmix 2013

Energislag	Andel
Kärnkraft	35,4 %
Fossilt (kol, olja, gas)	55,1 %
Förnybart	9,5 %

I Figur 15 visas utsläppen av fossil CO₂ i ett WTW perspektiv. Till skillnad mot resultaten från Energimyndigheten i Tabell 18, som bara gäller för själva drivmedlet, tar författarna här också hänsyn till skillnader i energianvändning i bussen. Energimyndighetens data gäller bara till producentens "grind" (exv. "raffinaderigrind" för konventionellt drivmedel) och distributionen av drivmedlet ingår således inte i Energimyndighetens siffror. För flytande drivmedel som de i denna studie brukar distributionen utgöra ca 1 % av total WTT. För gasformiga eller kryogena drivmedel kan den siffran vara betydligt större, då komprimering respektive kylning tillkommer, vilket är mer energikrävande än motsvarande delsteg för flytande drivmedel. Författarna har dock valt att försumma distribution och tankning men hänvisning till såväl enkelhet som att andra uppskattningar i studien inte heller är så exakta.



Figur 15. Fossil CO₂ i WTW perspektiv. Data bygger på LCA-data från Statens Energimyndighet, se detaljer ovan. Att stapeln för biogas är förhållandevis hög beror bl.a. på att verkningsgraden för biogasmotorn är lägre än för övriga alternativ (startar på 125 %). För hybridbussar har en bränslebesparing på 25 % använts.

I Figur 15 är HVO det bränsle som uppvisar bäst klimatnytta. Här används bränslet i en konventionell dieselbuss. Skulle det användas i ett hybridfordon så skulle man komma ännu lägre eftersom förbrukningen minskar. I detta exempel skulle alltså värdet för HVO multiplicerat med en faktor 0,75 (skulle ge ca 14 % i förhållande till diesel). Klimatnyttan för både biogas och etanol kan i denna beräkning ses som förhållandevis låga. Anledningen är att rapporten bygger på medelvärden från Statens Energimyndighet. Ofta kan man få väsentligt högre klimatnytta beroende på vilken etanol och biogas som används. Exempelvis så anses den etanol som Lantmännen tillverkar i Norrköping ha mycket höga klimatnyttovärden, ca 90 %. Värden över 100 % förekommer för biogas men bygger då i en del fall på en djurhållning som ger upphov till höga metanutsläpp när gödseln *inte* används som råvara till biogas. (En ändrad djurhållning kan vara ett alternativt sätt att minska utsläppen.) Beräkningarna i den här studien bygger som sagt var på Energimyndighetens medelvärden av inrapporterat underlag för respektive drivmedel. Det är en "ögonblicksbild" av hur situationen är i dag.

I Figur 15 utgör de totala utsläppen för konventionell dieselbuss referensen, dvs. 100 %. Det bör tilläggas att de bussar som använder biodrivmedel även släpper ut icke-fossil CO₂. När det gäller denna CO₂ förutsätter man att den absorberas av växande gröda och att den därmed ingår i det naturliga kretsloppet. Summerar man totala utsläpp av CO₂ även för biodrivmedel, dvs. om man lägger till även den icke-fossila delen, finner man oftast att den totala mängden CO₂ blir högre än 100 % i diesel-fallet ovan. Det kan tolkas som att energieffek-

tiviteten i framställningen av biodrivmedel inte är lika hög som för fossila drivmedel, där naturen så att säga redan har gjort en del av "jobbet" med omvandlingen. Omvandlingen av en bioråvara är mer omfattande och kräver mer energi i anspråk. Det totala resursbehovet, räknat på energibas, är således högre för biodrivmedel än för fossila drivmedel. Energimyndigheten redovisar emellertid inte sådana siffror i sin sammanställning, så författarna har valt att inte inkludera icke-fossil CO₂ i redovisningen ovan.

8 BULLER

8.1 Direktiv (70/157/EEG) av den 6 februari 1970

Direktivet har sedan 1970 justerats många gånger i olika delar. Senaste justeringen och nu gällande gränsvärden för ljudnivåer tillkom 1995. Tillhörande testmetod framgår av föreskriften FN/ECE nr 51 (mätmetod A) [47].

Provmetod (mycket förenklad beskrivning omfattande endast stadsbussar)

Eftersom fordons ljudnivåer erhållna med direktivets provmetod har relativt stora osäkerheter, finns i denna utredning anledning att kraftigt förenkla den komplicerade provmetodens beskrivning för att göra den mer tillgänglig. Specifikationerna innebär kortfattat för stadsbussar följande: Mätningar för fordon i rörelse ska göras inom en 20 meter lång mätsträcka, avgränsad med en startlinje och en mållinje. Ingångshastigheten vid startlinjen för ljudnivåmätningar ska vara 50 km/t eller $\frac{3}{4}$ av motorvarvtalet vid största nominella effekt (ECE). Fordonet ska köra på den växel för vilken det nominella motorvarvtalet uppnåtts just innan fordonet passerat mållinjen. Vid startlinjen ska fullt gaspådrag ges och pågå under hela mätsträckan. Varje värde som avlästs under mätningen ska minskas med 1 dB(A). Resultatet avrundas nedåt till närmaste heltal. Kommentar: Man har infört systematiska fel som undervärderar ljudnivåerna upp till 1,9 dBA lägre än uppmätta värden.

8.2 Gränsvärden

Fordon som används för befordran av passagerare, med mer än nio sittplatser, inkl. förarplatsen, och med en största tillåtna vikt av mer än 3,5 ton

- med en motoreffekt av mindre än 150 kW (ECE): 78 dBA
- med en motoreffekt av 150 kW (ECE) eller mer: 80 dBA

Förordning (EU) nr 540/2014 av den 16 april 2014

Förordningen antogs i april 2014, publicerades 27.5.2014 och trädde i kraft 20 dagar senare. Den ska tillämpas från och med den 1 juli 2016. Förordningen medför bland annat om vanliga stadsbussar:

- en ny testmetod för att mäta buller
- ändrade gränsvärden för buller anpassade till den nya testmetoden
- att fordonsdistributörer ska anstränga sig för att se till att varje fordons ljudnivå anslås
- Akustiskt fordonsvarningssystem införs för viss teknik

Provmetod (mycket förenklad beskrivning, utsnitt som passar stadsbussar)

Provmetoden beskrivs i förordningen. Den skiljer sig något från mätmetod B i föreskriften FN/ECE nr 51 som var grund för jämförelse av metoder. Metoderna för ljudnivåmätning och

förhållandena vid provningarna har omfattade specifikationer. De innebär kortfattat för stadsbussar följande: Mätningar för fordon i rörelse görs inom en 20 meter lång mätsträcka, avgränsad med en startlinje och en mållinje. När stadsbussar (kategori M3) passerar mållinjen under provningsförloppet ska motorvarvtalet ligga mellan 85 % och 89 % av det varvtal vid vilket motorn utvecklar sin nominella maxeffekt och fordonshastigheten ska vara 35 km/tim $\pm$ 5 km/ tim. Mellan start- och mållinjen ska en stabil acceleration säkerställas.

Gränsvärden

Den ljudnivå som uppmäts i enlighet med provmetoden, matematiskt avrundade till närmaste heltalsvärde, får inte överstiga följande gränsvärden tillämpliga för stadsbussar (M3):

Nominell motoreffekt $\leq$ 150 kW

- 76 dBA vid Fas 1: tillämplig på nya fordonstyper från och med den 1 juli 2016
- 74 dBA vid Fas 2: tillämplig på nya fordonstyper från och med den 1 juli 2020 och på första registrering från och med den 1 juli 2022
- 73 dBA vid Fas 3: tillämplig på nya fordonstyper från och med den 1 juli 2026 och på första registrering från och med den 1 juli 2027

150 kW < nominell motoreffekt $\leq$ 250 kW (ganska vanligt för nuvarande stadsbussar)

- 78 dBA vid Fas 1: tillämplig på nya fordonstyper från och med den 1 juli 2016
- 77 dBA vid Fas 2: tillämplig på nya fordonstyper från och med den 1 juli 2020 och på första registrering från och med den 1 juli 2022
- 76 dBA vid Fas 3: tillämplig på nya fordonstyper från och med den 1 juli 2026 och på första registrering från och med den 1 juli 2027

Nominell motoreffekt > 250 kW (inte helt ovanligt för nuvarande stadsbussar)

- 80 dBA vid Fas 1: tillämplig på nya fordonstyper från och med den 1 juli 2016
- 78 dBA vid Fas 2: tillämplig på nya fordonstyper från och med den 1 juli 2020 och på första registrering från och med den 1 juli 2022
- 77 dBA vid Fas 3: tillämplig på nya fordonstyper från och med den 1 juli 2026 och på första registrering från och med den 1 juli 2027

Konsumentinformation och märkning (Artikel 7)

Fordonstillverkare och fordonsdistributörer ska anstränga sig för att se till att varje fordons ljudnivå i decibel (dB(A)), uppmätt enligt förordningen, anslås på en framträdande plats på försäljningsstället och i tekniskt reklammaterial. Mot bakgrund av de erfarenheter som gjorts vid tillämpningen av förordningen ska kommissionen, senast den 1 juli 2018, göra en omfattande konsekvensbedömning av märkningsvillkoren för luftföroreningar och buller samt av konsumentinformationen. Kommissionen ska rapportera om resultaten av bedömningen till Europaparlamentet och rådet och om så är lämpligt lägga fram ett lagstiftningsförslag.

Akustiskt fordonsvarningssystem (AVAS)

Tillverkarna ska installera akustiska fordonsvarningssystem i nya typer av fordon med elhybriddrift eller med endast eldrift senast den 1 juli 2019 och i alla nya fordon senast den 1 juli 2021. AVAS-systemet ska automatiskt generera ljud inom ett minsta fordonshastighetsintervall från start och upp till cirka 20 km/tim samt vid backning. Om fordonet är försett med en förbränningsmotor som är i drift inom det ovan definierade fordonshastighetsområdet, ska AVAS-systemet inte generera ljud. AVAS-systemet ska ha en på- och avstängningsknapp som är lättillgänglig för fordonets förare. Efter omstart av fordonet ska AVAS-systemet automatiskt slås på. AVAS-systemets ljudnivå får dämpas tillfälligtvis under fordonets drift. Den ljudnivå som genereras av AVAS-systemet får inte överstiga ljudnivån hos ett fordon i kategori M1 som är försett med en förbränningsmotor och körs under samma förhållanden.

Jämförelse ljudnivåer mellan nuvarande metod med förordningens metod

Fordonens indelning i klasser med tillhörande gränsvärden är olika för direktivet och förordningen. Klassindelningen vid motoreffekten 150 kW är marginellt olika. Direktivet hänvisar till föreskriften FN/ECE nr 51 (mätmetod A). Den anger en gräns på 150 kW eller mer medan förordningen anger över 150 kW. Nästan lika men inte exakt. Klassindelningen vid 250 kW finns bara i förordningen. Man kan säga att den övre klassen i mätmetod A är delad i två i metod B, över och under 250 kW. Dessa olikheter påverkar dock inte jämförbarheten mellan mätvärden erhållna enligt direktivet och mätvärden enligt förordningen. Det gör däremot de olika provmetoderna och ljudnivåvärden med de två olika provmetoderna kan inte direkt jämföras utan närmare analys. Den befintliga testmetoden (Metod A) och en ny testmetod (Metod B) enligt FN/ECE nr 51 jämfördes och utvärderades efter att ha använts parallellt under perioden 1 juli 2007 till 6 juli 2010. En databas över provade fordon upprättades och skillnaderna analyserades. Eftersom mätmetoden enligt förordningen delvis skiljer sig från metod B, kan de analyserade skillnaderna mellan metod A och B användas inte direkt utan först efter justeringar.

Jämförelse metod A med metod B

För bussar (kategori M3) visar analyser att skillnaden i ljudnivåer mellan metod B och metod A är i medeltal – 0,7 dBA. Det betyder att 80 dBA i metod A motsvarar 79,3 dBA i metod B. För enskilda busstyper kan förhållandena vara annorlunda. Stadsbussar har i allmänhet ljudnivån 77 dBA maximalt i metod A, för att klara stora kunders krav. Tillåtet är 80 dBA. Vid metod B ligger ljudnivån med stor sannolikhet på 78 dBA [48, 49]

Jämförelse metod B med metod förordning, justeringar

På en viktig punkt, som ger systematiska skillnader i mätresultat, skiljer sig metod B med förordningens metod. Det är däckutrustningen. Metod B föreskriver däck anpassade till den axel de sitter på medan förordningsmetoden föreskriver däck representativa för fordonet. Det betyder att däck avsedda för styraxel får användas på drivaxel. Det blir tystare så [50].

Metod B föreskriver däck med minst 80 % av fullt mönsterdjup medan förordningen föreskriver mönsterdjup på minst 1,6 mm. Det blir tystare så även om det är olagligt i Sverige. Dessa skillnader gör att mätningar med metod förordning ger minst 1 dBA tystare resultat jämfört med metod B.

Jämförelse metod A med metod förordning

För stadsbussar blir skillnaden mellan nuvarande metod A och förordningens metod omkring 0 dBA. Förklaringen är att stadsbussar som i allmänhet har ljudnivån 77 dBA i metod A och 78 dBA i metod B måste tillföras ett avdrag på 1 dBA i metod B för att kunna jämföras med förordningens resultat.

Bullerutvecklingen framöver

Den nya förordningen med andra gällande gränsvärden för ljudnivåer fram till 2027 kommer inte att driva utvecklingen för tystare bussar jämfört med dagens bussar. Sedan ett antal år tillbaka har de flesta stadsbussar ljudnivåer på högst 77 dBA enligt metod A. Det beror på krav från marknaden och inte på gällande direktiv (högst 80 dBA). Det motsvarar förordningens slutliga krav 2027. Framöver kan teknikutvecklingen, med bussar helt eller delvis drivna av elmotor, minska bulleremissionerna i hög grad. Bussar med förbränningsmotorer blir också tystare då de senaste Euro- avgaskraven resulterar i partikelfilter som dämpar avgasbullret. Dessa utvecklingstrender tar inte förordningen hänsyn till. Det finns därför goda skäl och möjligheter för köpare att fortsätta ställa strängare bullerkrav än vad lagstiftningen ger uttryck för.

8.3 Miljökostnader - buller

Sammanfattning

Bussarnas buller bidrar till störningar och stress, vilket i förlängningen ger upphov till ökat antal drabbade av hjärt- och kärlsjukdomar samt av nedstämdhet och depressioner. Det får negativa konsekvenser för samhället genom sämre funktion hos människorna, minskad arbetsförmåga och ökade vårdkostnader. Därtill kommer kostnader för värdeminskning av fastigheter och för bullerskyddande åtgärder. Dessa belastningar kan sammanställas till samhällsekonomiska kostnader. Kostnaderna drabbar främst medborgare, kommuner, landsting, staten och fastighetsägare, men inte bussägarna direkt. Det är dolda kostnader som hittills inte funnits med i kostnadskalkyler. Kostnaderna uppstår vid körning och bör betraktas som tillkommande driftkostnader för bussarna. Busstrafikens omfattning varierar mycket, särskilt i större städer. Från låg trafik längs enstaka linjer med gles turtäthet i ytterområden till hög trafik längs central bussgator och terminaler där flera busslinjer sammanstrålar med täta avgångstider. Även den fysiska miljön och var människor uppehåller sig omkring bussarnas väg varierar mycket. Spridningen är stor och ett medelvärde är inte en vanlig

situation. För några typiska fall blir de samhällsekonomiska kostnaderna för en stadsbuss som drivs med en förbränningsmotor respektive med en elmotor enligt Tabell 20 nedan:

Tabell 20. Bullerkostnader i olika miljöer

Förutsättningar och resultat	Typfall 1, boende slutna kvarter		Typfall 2, boende öppna kvarter		Typfall 3, boende radhus och villor		Typfall 4, gaturum slutna kvarter	
Täthet antal utsatta personer	10 000/km ²		4 000/km ²		2 000/km ²		500/km	
Medelhastighet för alla fordon	25 km/t		35 km/t		45 km/t		25 km/t	
Bullertillägg för accelerationer	3 dBA		2 dBA		1 dBA		3 dBA	
Bullerskillnad el - bränsledrift	- 7 dBA		- 6 dBA		- 5 dBA		- 7 dBA	
Utsattas avstånd fr gatumitt, m	10	20	20- 300	40- 600	25- 250	50- 500	7,5- 10	7,5- 10
Trafik totalt, årsmedeldygn	3000	30000	2000	20000	2000	10000	3000	30000
Trafik bussar, årsmedeldygn	150	1500	100	1000	60	300	150	1500
Bullerkostnad för buss driven av förbränningsmotor, kr/km	4,91	0,77	6,62	3,59	3,80	2,12	2,91	0,75
Bullerkostnad för buss driven av elmotor, kr/km	1,03	0,16	1,57	0,89	1,10	0,56	0,69	0,16

Observera att "täthet antal utsatta personer" i gaturummet (500/km) räknas längs bussgatorna och inte över kvartersytorna (Tabell 20).

De fyra typfallen med två alternativa trafikflöden och bulleremissioner, är dock ett litet utsnitt av alla det förhållande som finns i städerna. Användbarheten av typfallen kan avsevärt utökas genom:

- Kostnader kan lätt justeras efter andra befolkningstätheter än de som använts i typfallen. Dubbel befolkningstäthet ger dubbel busskostnad/km.
- Kostnader behöver inte justeras efter andra turtätheter. Dubbel trafikmängd för bussar ger nära nog samma busskostnad/km.

Andra förhållanden är svårare att hantera. Andra trafikmängder, bebyggelsestrukturer, hastigheter och körsätt kan resultera i väsentligt andra kostnader. Det kräver omfattande simuleringar för att hitta matematiska samband, vilket ligger utanför detta uppdrag. En grov uppskattning av bussarnas bullerkostnader i en tätort kan ändå göras med hjälp av en eller flera av typfallen, deras olika andelar samt med andra tätheter på utsatta personer. Med dessa och andra antaganden kan busskostnaderna för buller vid innerstadsmiljö, en stor stad och en liten stad bli enligt Tabell 21.

Tabell 21. Summering av bullerkostnader i tre svenska städer

Miljö och resultat	Storstadsmiljöer liknande Stockholm innerstaden	Städer liknande Uppsala	Städer liknande Kristianstad
Bullerkostnad för buss driven av förbränningsmotor	4,15 kr/km	4,48 kr/km	3,60 kr/km
Bullerkostnad för buss driven av elmotor	0,87 kr/km	1,15 kr/km	0,97 kr/km

Att storstadsmiljöer liknande Stockholm innerstaden har lägre bullerkostnader jämfört med städer liknande Uppsala, beror på den stora andelen av slutna kvarter som Stockholm har. Många människor har där tysta innergårdar, vilket saknas i mer öppen bebyggelse.

Sammanfattningsvis kan sägas att vanliga stadsbussar orsakar oproportionellt mycket buller och kan vara mycket störande. Det innebär stora kostnader för samhället. Vanliga stadsbussar, som går uteslutande på förbränningsmotorer, kan kosta samhället omkring 4 kr/km för buller i tätorter, medan bussar under framdrift med enbart elmotor kan kosta omkring 1 kr/km. Störningskostnaderna minskar med cirka 25 % för varje dB tystare buss.

Betydelsen av tystare bussar kan knappast underskattas. De bidrar till en trivsammare stad där människor hellre vill bo, mötas och verka, till ökat välbefinnande och bättre hälsa samt till ökad kreativitet, inlärning och arbetskvalitet. Fastighetsvärdena ökar och skattebortfall samt kostnader för sjukvård minskar.

Tystare stadsbussar ökar möjligheterna att förtäta staden och samtidigt bygga ut kollektivtrafiken och minska bullret. Hållplatser kan placeras mer optimalt utan restriktioner på grund av buller, t.ex. i bostadsområden. Tystare bussar kan också minska behovet av buller-skyddsåtgärder. De minskar bullerstörningarna mer effektivt jämfört med andra bullerreducerande åtgärder, t ex mer dämpande fönster och beläggningar. Totalt sett bör därför utveckling av tystare bussar efterfrågas. Tystare bussar får kosta mer och ändå vara en god affär för alla; staden, medborgarna, näringslivet och fordonsindustrin.

8.3.1 Förutsättningar

Stadsbusstrafiken transporterar ett stort antal människor mellan bostäder, arbetsplatser, skolor, affärer och andra serviceinrättningar. Vanliga stadsbussar avger jämförelsevis mycket buller, särskilt vid accelerationer och tomgångskörning. Det kan medföra stora bullerstörningar i bussarnas omgivning, särskilt om busstrafiken är omfattande och har många hållplatser. Viktiga platser är bullerkänsliga omgivning där många människor vistas; på gator, torg och parker, i och strax utanför bostäder, vårdanläggningar, undervisningslokaler och barnstugor. Bussarnas buller bidrar till störningar och stress, vilket i förlängningen ger upphov till ökat antal drabbade av hjärt- och kärlsjukdomar samt av nedstämdhet och depressioner. Det får negativa konsekvenser för samhället genom sämre funktion hos människorna, minskad arbetsförmåga och ökade vårdkostnader. Därtill kommer kostnader för värde-

minskning av fastigheter och för bullerskyddande åtgärder. Belastningen på människorna och dess följder kan sammanfattas med samhällsekonomiska kostnader för buller. Kostnaderna kan minskas med traditionella skyddsåtgärder, t ex bullerreducerande beläggningar och fönster. Det är kostsamma lösningar för samhället. En ytterligare åtgärds möjlighet är att välja tystare bussar. Visserligen kan det minska det totala trafikbullret bara något, men det berör desto fler människor. En tystare buss kan därför minska störningarna och de samhällsekonomiska störningskostnaderna avsevärt.

8.3.2 Samhällsekonomisk värdering av buller

Varje busstur orsakar i varierande grad kostnader för samhället på grund av buller. Det drabbar främst kommuner, landsting, staten, fastighetsägare och enskilda medborgare, men inte bussägarna direkt såvida inte bullret på något vis har ett pris. Kostnaderna uppstår vid körning och kan därför betraktas som en form av driftkostnader för bussarna. Det är i allmänhet dolda kostnader som hittills inte finns med i kostnadskalkyler. Se [51]. Bullerkostnaderna anges lämpligast i kr per körd enhetssträcka, vilket underlättar jämförelser och summering med andra driftkostnader. För att kunna beräkna bullerkostnaderna behövs kostnadsfunktioner kopplade till störningar och bullernivåer. Kostnadsfunktioner finns dock bara klart definierade för bostadsmiljöer. I städer finns det gott om andra miljöer med betydande bullerstörningar. Många berörs också av buller inne i bussar. Väsentliga delar fattas således i de samhällsekonomiska värderingarna och kostnaderna för trafikbuller. Antaganden behöver därför göras för att kunna ge en rättvisande kostnadsbild. De samhällsekonomiska kostnadsfunktionerna för boende bör direkt kunna tillämpas även för andra miljöer som har förhållanden som liknar hemmamiljö. Det kan främst vara patienter på vårdinrättningar och också barn på barnstugor och förskolor. De kan förväntas ha i liknande störningsgrad vid samma bullernivåer. För andra miljöer beslutar, använder eller föreslår Naturvårdsverket, Trafikverket och Folkhälsomyndigheten ett antal riktvärden på trafikbuller, varav flera är aktuella för städer. Riktlinjerna är dock inte synkroniserade med varandra. De står för olika störningsgrad och standard och kan därför inte användas för att översätta kostnadsfunktioner till andra miljöer än dem som liknar boende. Kostnadsfunktioner för andra miljöer får därför tas fram på annat sätt. Funktionerna för boende kan användas som bas men kostnadsfunktionen förskjuts så att bullernivån i den aktuella miljön motsvarar samma störningsgrad som i boendemiljö. Det förutsätter att störningsgraden för de andra miljöerna är kända eller kan uppskattas samt har liknande progressivitet vid olika bullernivåer.

8.3.3 Bostäder

Nu aktuella kostnadsfunktioner för boende finns definierade i ASEK 5.1 [52]. Kostnaderna är uttryckta i kr/år för en person vid och i sin bostad. Kostnaderna är beroende på bullrets nivå utomhus respektive inomhus. Bullernivåerna avser den mest utsatta fasaden utomhus samt bullerkänsliga rum inomhus. Bullernivåerna gäller vid trafikflöden i medeltal under ett år (ÅDT = årsdygnstrafik). Kostnader finns över nivån 45 dBA utomhus, respektive 25 dBA in-

omhus. Kostnaderna ökar progressivt med ökande nivåer. Att minska bullret vid höga nivåer har därför större verkan än vid låga.

8.3.4 Förskolor/barnstugor, vårdinstitutioner och hotellrum

Människor på förskolor/barnstugor, vårdinstitutioner och hotellrum kan förväntas ha ungefär samma behov av vila och återhämtning som boende. Störningsnivåer kan därför antas vara desamma som för bostäder vid samma bullernivåer. Värdena utomhus är dock inaktuella för hotell och kanske också för vissa vårdinstitutioner.

8.3.5 Skolor

Trafikbullret utomhus vid raster, bör inte störa lekar eller innebära svårigheter med samtal. Det är dock inte fråga om vila såsom vid bostäder. Trafikbullret inomhus bör inte störa lektionerna. Kostnadsfunktioner kan simuleras utgående från störningsnivåer som kan antas vara desamma som för bostäder vid uppskattningsvis 10 dBA högre bullernivåer. Störningskostnader börjar då vid 35 dBA inomhus. Det stämmer väl överens med Arbetsmiljöverkets allmänna råd om bland annat talkommunikation inomhus.[53]. Utomhus kan man anta att störningarna börjar vid 55 dBA för att däröver öka progressivt.

8.3.6 Kontor och andra relativt bullerkänsliga lokaler

Mycket höga trafikbuller kan störa inomhus i kontor, konferenslokaler, undervisningslokaler vid universitet mm. Där pågår aktiviteter som inte har samma behov av avkoppling och vila som i bostäder. Samma störningsgrad kan därför förväntas uppträda vid högre nivåer jämfört med bostadsrum/bostäder, uppskattningsvis omkring 10 dBA. Störningskostnader börjar då vid 35 dBA inomhus. Det stämmer väl överens med Arbetsmiljöverkets allmänna råd om bland annat talkommunikation [53]

8.3.7 Parker

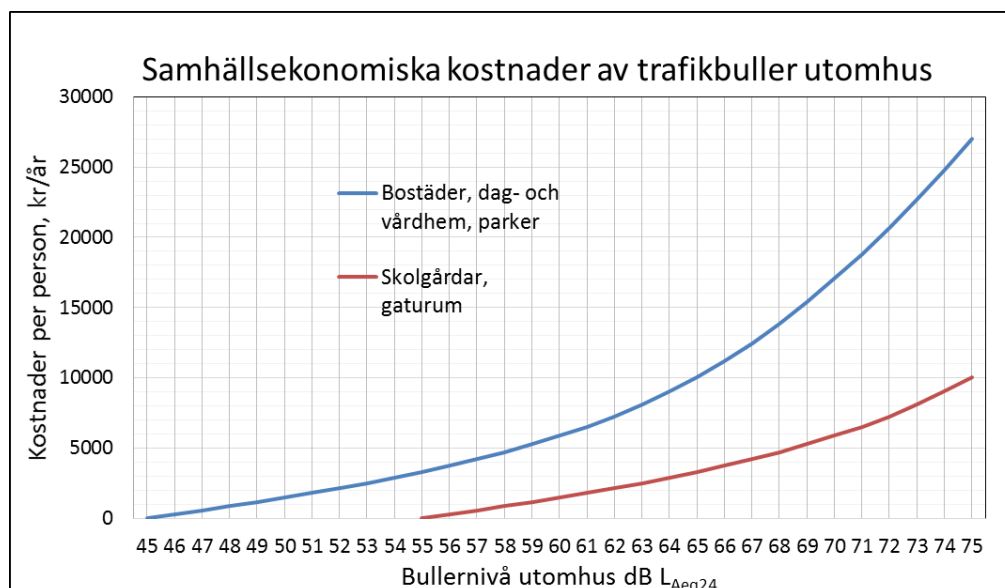
Parker mister sin funktion för enskild återhämtning eller talkommunikation och umgänge om bullernivåerna är höga. Störningsnivåer kan förväntas likna de som är vid bostäders uteplatser vid samma bullernivåer. Det stämmer överens med resultaten av forskningsprojekten i Hosanna <http://www.greener-cities.eu/> och i en rapport om upplevd ljudmiljö i stadsnära grönområden och stadsparker [54]. Störningskostnader kan börja vid omkring 45 dBA.

8.3.8 Oskyddade trafikanter och andra i gaturummet

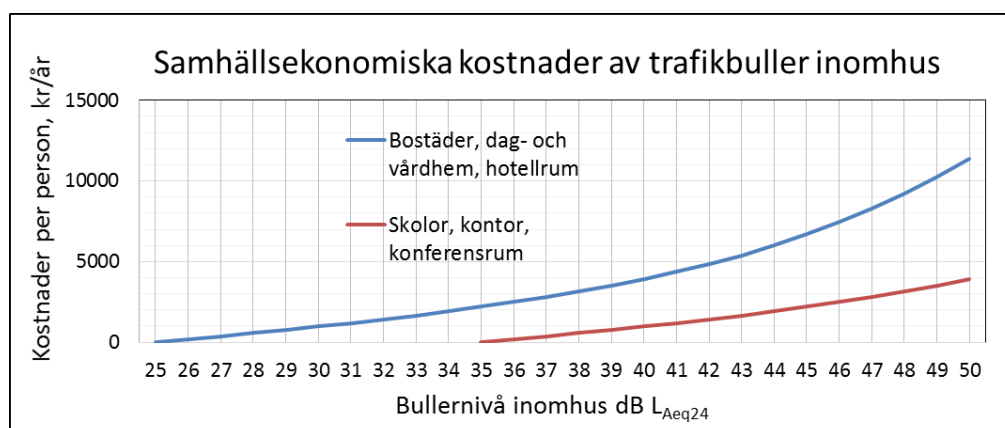
I gaturummet förväntas trafik och trafikbuller. Höga nivåer kan ändå störa, t ex att det är svårt att kommunicera. Det är också stressande. Enstaka högljudda fordon kan också minska trafiksäkerheten, när bullret maskerar ljud från andra fordon och cyklister, viktiga för varseblivning. Vid 65 dBA bullernivå i medelnivå kan man räkna med påtagliga störningar och maskering av andra ljud. Med ledning av detta kan kostnader uppskattas börja vid 55 dBA.

8.3.9 Sammanfattning av antagna kostnadsfunktioner aktuella i städer

I Figur 16 (utomhus) Figur 17 (inomhus) har de antagna kostnadsfunktionerna för respektive städer sammanställts.



Figur 16. Samhällsekonomiska kostnader av trafikbuller utomhus



Figur 17. Samhällsekonomiska kostnader av trafikbuller inomhus

8.3.10 Bullerberäkningsmetod

Kostnadsfunktionerna utgår från bullernivå på platser vid exponerade personer. Funktionerna är kopplade till bullernivåer för det totala trafikflödet under ett dygn i medeltal under året och inte till enskilda fordon, t.ex. en buss. Att kostnaderna inte är kopplade till ett fordon torde inte vara några problem, trots att vi vill veta kostnaderna för en buss. Den enskilda bussens buller kan inte betraktas isolerat som om inget annat ljud finns. Störningar beror på den totala ljudbilden som längs gator och trafikleder domineras av trafikbullret. Bussarnas buller utgör en andel av det totala bullret. Andelen varierar med bussarnas bulleregenskaper och busstrafikens storlek och dess förhållande till annan trafik. Den enskilda bussens bul-

leregenskaper är därför viktiga. De har samband till bullerexponering, störningar och samhällsekonomiska kostnader. Kostnader för buller förutsätter att det finns utsatta och störda människor längs busslinjerna. Förutom att bussarna bullrar olika mycket, varierar bullret med avståndet beroende på den fysiska miljön som påverkar bullrets spridning. Följande förhållanden påverkar bussarnas bullerkostnader:

- Bussmodellernas bulleremissioner i ljudnivå och ljudkaraktär
- Körsätt, accelerationer, växlingar, hastigheter
- Storlekar på trafikflöden för respektive bussar, lastbilar och lätta fordon
- Variationer i den fysiska miljön som förändrar ljudspridningen
- Variationer i husens fasaddämpning för hur bullret stör inomhus
- Skillnader i vilka situationer människor befinner sig, känslighet för bullerstörningar
- Skillnader i täthet av bullerutsatta människor, hur många som berörs

Dessa förhållanden behöver simuleras med en beräkningsmodell och i detta fall är det viktigt att bussars olika emissionsegenskaper ger rättvisande utslag.

8.3.11 Beräkningsmodell

Mest passande befintliga modell i detta fall bedöms vara Nord2000Road, version som är kalibrerad mot de fordon och beläggningar som råder i Sverige [55]. Modellen har tre kategorier fordon,

- Lätta fordon med maximal vikt av 3,5 ton
- Medium tunga fordon, vikt 3,5- 12 ton, bland dem bussar med 2 axlar och 6 hjul med längd 7,7- 12,5 m (vanliga stadsbussar)
- Tunga fordon, vikt över 12 ton, bl.a. bussar med 3-4 axlar med längd 12,5- 15,9 m

Vid vanliga hastigheter i städer, runt 30-50 km/t, är lätta fordon omkring 8- 6 dB tystare jämfört med medium tunga som i sin tur är 4 dB tystare än mycket tunga fordon.

8.3.12 Implementerad modell och använt program

Modellen finns implementerad i ett Excel- baserat program som kallas BEVA, ett program från Trafikverket för samhällsekonomisk beräkning av bullerstörningar för väginvesteringsprojekt, se <http://www.trafikverket.se/Foretag/Planera-och-utreda/Planerings--och-analysmetoder/Samhallsekonomisk-analys-och-trafikanalys/Prognos--och-analysverktyg/Fliksida---verktyg/BEVA/>; Programmet har använts vid beskrivningar nedan om typfall och exempel på beräkning av bullerkostnader. Emissionsmodellen, om fordons bulleregenskaper, i BEVA är exakt densamma som i Nord2000 Road. BEVA har dock en starkt förenklad version av spridningsmodellen i Nord2000 Road. Vissa justeringar i emissionsmodellen är gjorda. De är:

- Hänsyn till bussars olika bulleremissionsegenskaper i nivå och spektrum. Det påverkar ljudnivåerna och störningarna för omgivningen och inomhus

- Anpassning till de hastighetsförändringar som normalt råder tätorter

Vid beräkningarna används skillnader i bulleremissioner mellan ingående fordon, lätta, medeltunga och tunga fordon samt analyserade bussar.

8.3.13 Stadsbussarnas bulleregenskaper

Bussarnas bulleregenskaper i stadstrafik beror huvudsakligen på framdrivningssystemet, drivlinan, medan däckens och vägytans betydelse är liten. Förbränningsmotorer, särskild de som har kompressionständning, alstrar höga tryck- och därmed höga ljudimpulser. Rent tekniskt kan även en sådan drivlina göras tyst men det kräver att man redan från början i utvecklingen av fordonen värderar bullerfrågan och bereder plats för kostnadseffektiva lösningar. Utformning av motorblock, fläktsystem, hjälppaggregat, motorrum, ljuddämpare, avgasefterbehandling mm spelar stor roll. Fordonsindustrin verkar i en internationell marknad och under internationell lagstiftning. Drivande för utveckling till tystare fordon för omgivningen kan vara av två slag; dels direktiv och förordningar om gränsvärden för ljudnivåer från fordon och dels strängare krav än gränsvärdena från köpare. För stadsbussar fungerar marknadens krav och efterfrågan efter samhällets behov relativt väl. Stadsbussar är därför markant tystare än vad gällande lagstiftnings (minimi) krav ger uttryck för. Tekniken med bussar helt eller delvis drivna av elmotor, kan minska bulleremissionerna mycket kraftigt, upp till 90 %. Det finns krav på tilläggs ljud för att de är så tysta av trafiksäkerhetsskäl. Någon god grund för att tilläggs ljud ökar trafiksäkerheten finns inte [56].

8.3.14 Typfall

Busstrafikens omfattning varierar mycket, särskilt i större städer. Från låg trafik längs enskilda linjer med gles turtäthet i ytterområden till hög trafik längs central bussgator och terminaler där flera busslinjer sammanstrålar med täta avgångstider. Även den fysiska miljön och var människor uppehåller sig omkring bussarnas väg varierar mycket. Spridningen är stor och ett enda medelvärde kan inte representera enskilda förhållanden. Ett mindre antal, men väl valda fall kan tillsammans passa flera olika förhållanden som råder i våra tätorter. De typiska fallens förekomst och andel varierar med tätorternas strukturer. Följande typfall är definierade och används för tre olika stadskaraktärer enligt nedan;

1. Bostäder i höga hus i slutna kvarter
2. Lägenheter i öppen bebyggelse
3. Radhus och villor
4. Gaturum

Bullerkostnader per km är beräknade för ett relativt lågt totalt trafikflöde och ett relativt högt flöde för alternativa framdrifter av bussar, dels med förbränningsmotor och dels med elmotor. Drift med elmotor kan ske i elbuss eller i hybridbuss i eldriftläge.

Typ 1. Bostäder i höga hus, 6 våningar och mer, i slutna kvarter

De höga husen i slutna kvarter medför höga bullernivåer på gatusidan genom multipla reflexioner, medan gårdssidan är relativt tyst. Vid gatukorsningar sprids dock bullret längs tvärgatorna och i viss mån också genom gårdsöppningar. Uppskattningsvis har omkring 60 % av de boende tillgång till tyst sida mot innergården och räknas därför inte med bland de bullerutsatta.

Antagna förhållanden:

- Befolkningstäthet: 10 000 personer/km². Längs gatusidorna: $1000 \cdot 0,40 = 400$ Personer/km.
- Trafikflöden: 3 000 och 30 000 fordon/dygn varav bussar 5 % och övriga tunga fordon 2 %.
- Medelhastighet för den totala trafiken: 25 km/t
- Bullertillägg för större andel accelerationer: 3 dBA
- Avvägd bullernivåskillnad mellan buss med framdrift förbränningsmotor och el: 7 dBA
- Avstånd gatumitt till närmaste fasad: 10 respektive 20 m

Resultat, kostnader för samhället av buller från enskild buss:

- Vid trafikflödet = 3 000 fordon/dygn och avstånd till fasad 10 m:

Bussar med framdrift förbränningsmotor: 4,91 kr/km

Bussar med framdrift el: 1,03 kr/km

- Vid trafikflödet = 30 000 fordon/dygn och avstånd till fasad 20 m:

Bussar med framdrift förbränningsmotor: 0,77 kr/km

Bussar med framdrift el: 0,16 kr/km

Typ 2. Bostäder i 3- 6 våningar i öppen bebyggelse

Den öppna bebyggelsen gör att bullrets sprids relativt långt från busslinjerna. Antagna förhållanden:

- Befolkningstäthet: 4 000 personer/km².
- Trafikflöden: 2000 och 20 000 fordon/dygn varav bussar 5 % och övriga tunga fordon 3 %
- Medelhastighet för det totala trafikflödet: 35 km/t
- Bullertillägg för större andel accelerationer: 2 dBA
- Avvägd bullernivåskillnad mellan buss med framdrift förbränningsmotor och el: 6 dBA
- Avstånd gatumitt till fasader: 20- 300 m respektive 40- 600 m

Resultat, kostnader för samhället av buller från enskild buss:

- Vid trafikflödet = 2 000 fordon/dygn och avstånd till fasader 20- 300 m:

Bussar med framdrift förbränningsmotor: 6,62 kr/km

Bussar med framdrift el: 1,57 kr/km

- Vid trafikflödet = 20 000 fordon/dygn och avstånd till fasader 40- 600 m:

Bussar med framdrift förbränningsmotor: 3,59 kr/km

Bussar med framdrift el: 0,89 kr/km

Typ 3. Radhus och villor i 1- 2 våningar

Den öppna bebyggelsen gör att bullrets sprids relativt långt från busslinjerna. Antagna förhållanden:

- Befolkningstäthet: 2 000 personer/km².
- Trafikflöden: 2000 och 10 000 fordon/dygn varav bussar 3 % och övriga tunga fordon 7 %
- Medelhastighet för det totala trafikflödet: 45 km/t
- Bullertillägg för större andel accelerationer: 1 dBA
- Avvägd bullernivåskillnad mellan buss med framdrift förbränningsmotor och el: 5 dBA
- Avstånd gatumitt till fasad: 25- 250 m respektive 50- 500 m

Resultat, kostnader för samhället av buller från enskild buss:

- Vid trafikflödet = 2 000 fordon/dygn och avstånd till fasader 25- 250 m:

Bussar med framdrift förbränningsmotor: 3,80 kr/km

Bussar med framdrift el: 1,10 kr/km

- Vid trafikflödet = 10 000 fordon/dygn och avstånd till fasader 50- 500 m:

Bussar med framdrift förbränningsmotor: 2,12 kr/km

Bussar med framdrift el: 0,56 kr/km

Typ 4. Gaturum i slutna kvarter

Antagna förhållanden:

- Täthet av oskyddade trafikanter på gator och trottoarer: 500 personer/km
- Trafikflöden: 3 000 och 30 000 fordon/dygn varav bussar 5 % och övriga tunga fordon 2 %.
- Medelhastighet för det totala trafikflödet: 25 km/t
- Bullertillägg för större andel accelerationer: 3 dBA
- Avvägd bullernivåskillnad mellan buss med framdrift förbränningsmotor och el: 7 dBA
- Avstånd gatumitt till trafikanter: 7,5- 10 m

Resultat, kostnader för samhället av buller från enskild buss:

- Vid trafikflödet = 3 000 fordon/dygn och avstånd till oskyddade trafikanter: 7,5 m

Bussar med framdrift förbränningsmotor: 2,91 kr/km

Bussar med framdrift el: 0,62 kr/km

- Vid trafikflödet = 30 000 fordon/dygn och avstånd till oskyddade trafikanter: 10 m

Bussar med framdrift förbränningsmotor: 0,75 kr/km

Bussar med framdrift el: 0,16 kr/km

8.3.15 Sammanställning, kostnader för bussar under olika förhållanden

De sammanställda kostnaderna för bussar under olika förhållanden visas i Tabell 22.

Tabell 22. Sammanställning, kostnader för bussar under olika förhållanden

Förutsättningar och resultat	Typfall 1, boende slutna kvarter		Typfall 2, boende öppna kvarter		Typfall 3, boende radhus och villor		Typfall 4, gaturum slutna kvarter	
Täthet antal utsatta personer	10 000/km ²		4 000/km ²		2 000/km ²		500/km	
Medelhastighet för alla fordon	25 km/t		35 km/t		45 km/t		25 km/t	
Bullertillägg för accelerationer	3 dBA		2 dBA		1 dBA		3 dBA	
Bullerskillnad el - bränsledrift	- 7 dBA		- 6 dBA		- 5 dBA		- 7 dBA	
Utsattas avstånd fr gatumitt, m	10	20	20- 300	40- 600	25- 250	50- 500	7,5- 10	7,5- 10
Trafik totalt, årsmedeldygn	3000	30000	2000	20000	2000	10000	3000	30000
Trafik bussar, årsmedeldygn	150	1500	100	1000	60	300	150	1500
Bullerkostnad för buss driven av förbränningsmotor, kr/km	4,91	0,77	6,62	3,59	3,80	2,12	2,91	0,75
Bullerkostnad för buss driven av elmotor, kr/km	1,03	0,16	1,57	0,89	1,10	0,56	0,69	0,16

8.3.16 Analys och användning av typfallen

De fyra typfallen med två alternativa trafikmängder och bulleremissioner, är ett väldigt litet utsnitt bland alla de förhållanden som finns i städerna. Användbarheten av typfallen kan ändå avsevärt utökas om enkla samband mellan olika förhållanden och samhällsekonomiska kostnader kan hittas. En djupare analys av simulerade fall visar:

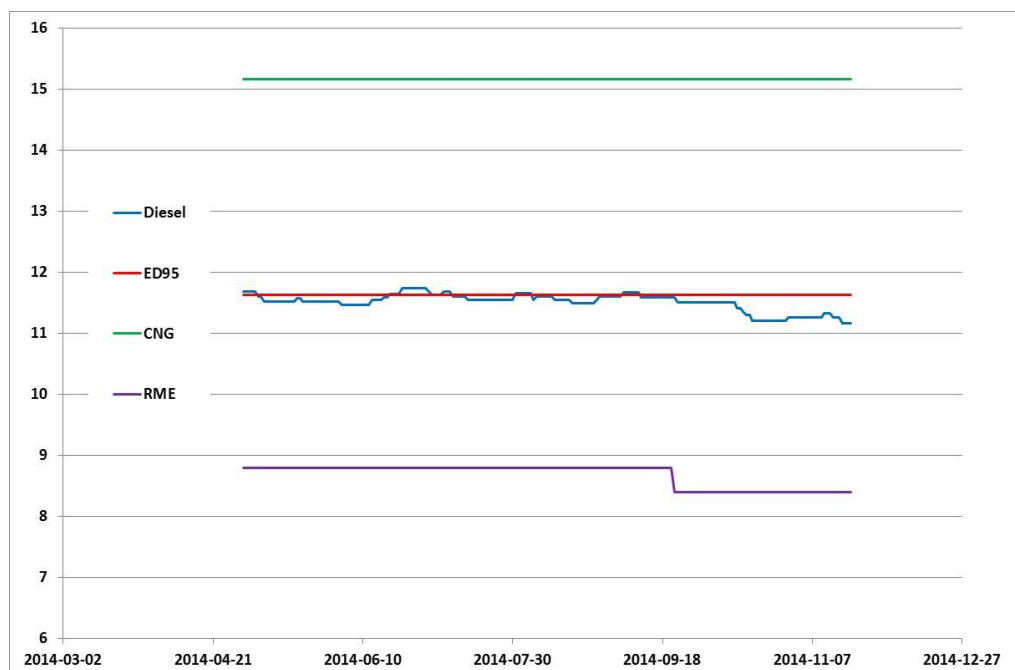
- Dubbel densitet utsatta människor ger dubbel samhällsekonomisk kostnad för buller. Kostnaden/km för en buss fördubblas. Befolkningsdensiteten utgör alltså en skalfaktor, vilket gör att typfallens resultat om kostnader lätt kan justeras efter andra befolknings-tätheter än vad som använts i typfallen.
- Dubbel trafikmängd för bara bussar men inte för andra fordon ger ungefär dubbel samhällsekonomisk kostnad för buller. Kostnaden/km för en buss är nära nog densamma. Turtätheten påverkar inte km-kostnaden och andra tätheter behöver man inte ta hänsyn till.

- Ökad trafikmängd för bussar och motsvarande mindre antal trafikmängd för personbilar ger lägre samhällsekonomisk kostnad för buller även för bullriga bussar. För tysta bussar minskar kostnaderna än mer.
- Ökad trafikmängd för både bussar och andra fordon ger ökad samhällsekonomisk kostnad för buller men inte i samma grad. Kostnaden/km för en buss minskar därför med trafikmängden. Det sker i olika grad beroende på bebyggelsestruktur. För slutna kvarter och för randbebyggelse är minskningen större jämfört med öppen bebyggelse som utbreder sig på olika avstånd från gatorna. Andra förhållanden än de som beskrivs i typfallen ger därför mer eller mindre andra kostnader än de angivna.
- Andra medelhastigheter och annan bebyggelsestruktur, bl.a. andra avstånd, kan ge avsevärt andra kostnader. Typfallens kostnader kan i så fall bli missvisande.

9 EKONOMI

9.1 Bränslepriser

I Figur 18 nedan visas statistik från IDS priser på fyra drivmedel under tiden från 1 maj till och med den 20 november 2014. Som följd av kraftigt fallande råoljepriser efter sommaren så har priset på diesel gått ner. Även priset på RME har sänkts i takt med sjunkande dieselpreis. För CNG och ED95 har priserna legat still under tidsserien. CNG är samma sak som fordonsgas här, IDS kallar gasen för CNG fast det rör sig om fordonsgas.



Figur 18. Utveckling av bränslepriser under 2014 (kr/l eller kr/kg för gas)

Medelvärde under tidsserien är (alla priser är inklusive energi- och koldioxidskatt men exklusive moms). I detta arbete så använder vi priserna enligt Tabell 23 nedan. Vi är i skrivande stund inne i en period med snabbt fallande råoljepriser. Hur priset på råolja och drivmedel kommer att utvecklas framöver är inte möjligt att förutspå. För urea (Adblue) har priset halva dieselpriSET använts. Detta är givetvis på ett ungefär men som tumregel så brukar urea kosta cirka hälften av vad dieseln kostar.

”Riksdagen har beslutat om ändringar i lagen (1994:1776) om skatt på energi som gäller från den 1 januari 2015. Skattbefrielsen för höginblandad eller ren FAME/RME minskar från 100 procent till 44 procent av energiskatten. Skattebefrielsen för koldioxidskatt ändras däremot inte utan är 100 procent även fortsättningsvis. www.skatteverket.se”

Detta innebär att 56 % skatt ska betalas på 1,83 kr (energiskatt för MK1), 1,02 kr per liter. Hur mycket höjningen vid pumpen blir är svårt att sätta om men eftersom skatten höjs med ca

1 kr per liter så läggs detta på priset som gällde innan årsskiftet. Vi har här räknat på att 100 % av FAME:n är biobaserad, d.v.s. att även metanolen som använts haft bioursprung. Man får bara "skatterabatt" för de delar av bränslet som har bioursprung så den skatt som redovisas här är att betrakta som en minimiskatt för FAME.

Tabell 23. Bränslepriser(ex moms) som ligger till grund för beräkningar

Drivmedel	Enhet	Pris
Diesel	kr/liter	11,51
ED95	kr/liter	9,30
CNG	kr/kg	15,16
FAME (RME)	kr/liter	9,67 ¹
Adblue	Kr/liter	5,80

¹Vid tidpunkten för jämförelsen så var priset för FAME (RME) 8,67 kr/liter exklusive moms. Vi har här lagt till 1 kr för extra skatt som ska införas vid årsskiftet 2014/2015.

Vad olika bussoperatörer betalar för bränslen varierar men normalt så har de olika former av rabatter. I denna rapport användes bränslepriserna enligt tabellen ovan. Som nämnts ovan så har råoljepriset fallit mycket kraftigt under senare tid och därmed även drivmedelspriserna. De priser vi använder kan därför ses som för höga. Vi har dock valt att använda medelpriser över en tid bakåt i tiden. Vart priserna på några års sikt tar vägen kan som sagt ingen svara på. Som exempel på detta kan nämnas att Nordeas oljeprisexpert under sommaren 2014 sa att inget tyder på att råoljepriserna kan gå ner. Då kostade råoljan ca 115 dollar per fat. Samma expert sa under hösten att nu kommer det att vända uppåt. Då kostade oljan ca 70 dollar per fat. Den 14 januari 2015 kostade råoljan ca 45 dollar per fat.

9.2 Sammanfattande tabeller ekonomi

Tabell 24 nedan anger kostnader relativt en tvåaxlig 12-meters buss i låggolvsutförande. Siffrorna som anges är grova och ska läsas som en fingervisning och som ett slags medel av vad som kan förväntas vara normalt. I drift/bränslepris ingår då vad bränsleleverantören tar ut för att tillhandahålla lager- och tankningsanläggning. Vissa länstrafikbolag köper exempelvis gasen direkt på ledning eller leveransdepå och står själva för lager och tankanläggning. Då tillkommer i stället kapitalkostnad och diverse rörliga kostnader för detta men totalt kan kostnaden bli lägre eftersom de kan ha en längre avskrivningstid än vad en bränsleleverantör kan ge i ett trafikavtal på 8 år.

Tabell 24. Kostnader relativt konventionell dieslbuss

	Inköp	Drift (bränslepris)	Underhåll och Service
FAME-biodiesel	100 ¹	91 ⁵	110 ⁹
Biogas	118 ²	120 ⁶	108 ¹⁰
ED95	105 ³	133 ⁷	120 ¹¹
Diesel	100	100	100
Dieselhjärid	132 ⁴	75 ⁸	110 ¹²
El	data saknas ¹³		

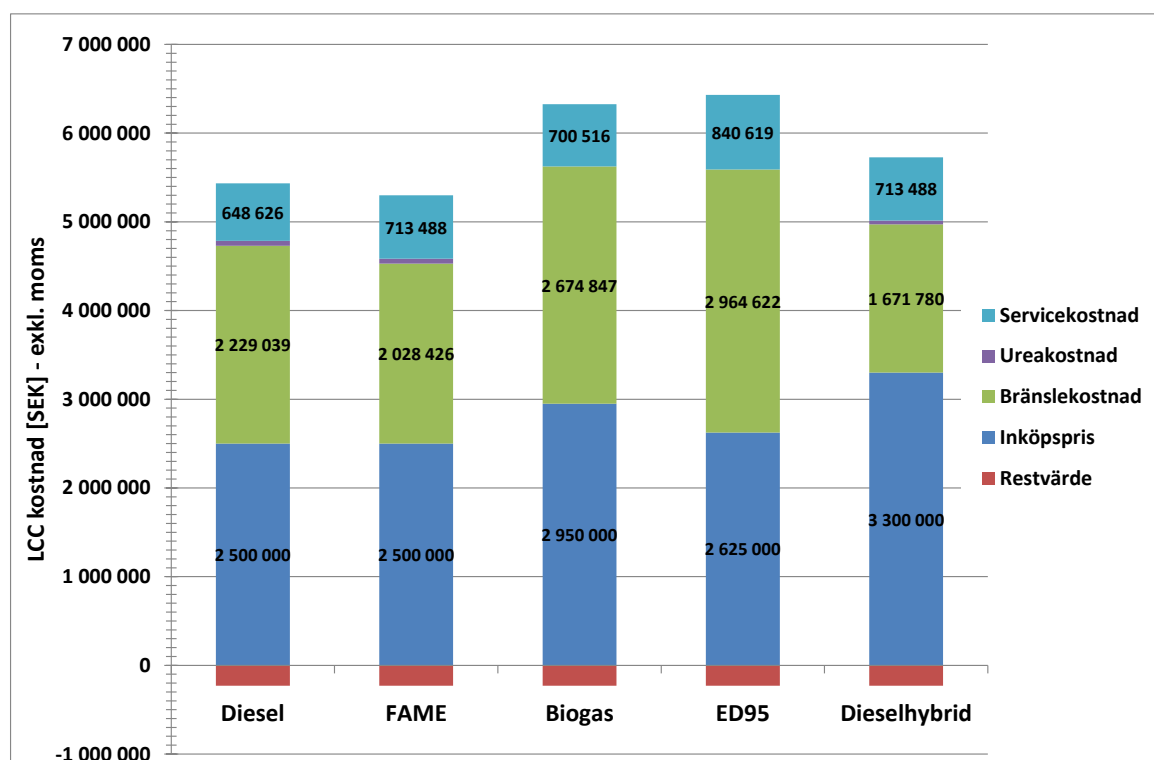
1. Enligt samtal med Scania så är inköpspriset för en biodieslbuss (FAME) det samma som för en dito dieseldriven buss.
2. Priset för en biogasbuss jämfört med en dito dieseldriven buss 18 %. Scania har tidigare nämnt ca 15 % dyrare.
3. I dagsläget finns ingen etanolmotor (jan 2015) så prispåslaget om 5 % är en uppskattning från tidigare modeller. Detta kan eventuellt vara något för högt men det är vår bedömning är att priset för en etanolbuss kommer att vara något högre än för en dito dieslbuss.
4. Enligt MAN så kostar en konventionell 2-axlig dieslbuss ca 2 500 000 kr. Påslaget för hybridversionen är ca 800 000 vilket ger 32 % högre pris – svar via enkät (se även kapitlet om enkäter nedan)
5. Enligt Scania så drar en biodieselmotor 8 % mer än dieselmotorn (skillnaden i energiinnehåll). Med de bränsleproser som användes i denna rapport (se kapitlet om bränslepriser ovan) så blir det ca 20 % billigare att köra på FAME än på diesel
6. Priser på CNG och diesel har använts enligt de priser som anges i kapitlet om bränslepriser ovan. Värmevärdet 10,9 kWh/Nm³ har använts för gasen och 9,77 kWh/liter för diesel. Detta ger att på energibasis så är gasen ca 4 % billigare än diesel. Vid antagande om att gasbussen förbrukar ca **25 % mer energi** än en dito dieslbuss så blir merkostnaden för bränsle ca 20 % högre. MAN anger på sin hemsida att gaspriset är ca 40 % lägre än för diesel och att detta gör att bussens livskostnad (LCC) bli lägre än för en dieslbuss. Det låga gaspriset är antagligen hämtat från Tyskland och kan inte antas gällande för svenska förhållanden. http://www.bus.man.eu/se/se/stadsbussar/man-lion_s-city-cng/effektivitet/Effektivitet.html. Biogasbussar behöver inte använda urea (Adblue). Grovt sett så kan man räkna med att ureaförbrukningen är ca 2-3 % av dieselförbrukningen och att priset är ca halva dieselpriiset per liter.
7. Enligt samtal med Scania så är skillnaden i bränsleförbrukning mellan diesel och ED95 den samma som skillnaden i bränslenas energiinnehåll. Med de bränslepriser som användes i denna rapport (se kapitlet om bränslepriser ovan) så blir merkostnaden ca 33 % om ED95 används. Etanolbussar behöver inte använda urea (Adblue). Grovt sett så kan man räkna med att ureaförbrukningen är ca 2-3 % av dieselförbrukningen och att priset är ca halva dieselpriiset per liter.
8. Vad besparingen blir med att använda hybriddrift varierar kraftigt från fall till fall. Volvo säger upp till 39 % och MAN säger upp till 30 %. I dagsläget finns inte mycket relevanta data om hur mycket bränsle som kan sparas i en typisk stadsmiljö. Det finns spridda studier och resultat men de flesta är i dagsläget från USA och det är inte samma typ av bussar med mera. Vi har valt att i denna studie använda siffran 25 % som ett medelvärde på hur mycket bränsle som kan besparas med en hybridbuss. I framtiden när data presenteras från verkliga fall så kan denna siffra justeras. I en rapport från VTT [20] anges att besparingen är ca 32 %. Vi bedömer att denna siffra är något för hög.
9. För bussar som körs på FAME så krävs mer service. Exempelvis så byts olja och oljefilter dubbelt så ofta om för en dito dieslbuss. [Källa – Leif Magnusson, Svensk kollektivtrafik]
10. [Källa – Leif Magnusson, Svensk kollektivtrafik]
11. Service för ED95-bussar är mer omfattande än både FAME-, och dieseldrivna bussar. Bland annat så byts olja och oljefilter var 10 000 km. Oljan som används är dyrare än för övriga bränslen [Källa – Leif Magnusson, Svensk kollektivtrafik och samtal med Scania]
12. Enligt MAN så är underhållskostanden maximalt 10 % högre för hybridversionen – svar via enkät (se även kapitlet om enkäter nedan). I en rapport från VTT [20] anges att skillnaden är ca 13 %
13. Elbussar är än så länge ett nytt fenomen varför inga relevanta data finns att presentera.

9.3 LCC-kostnader (Life cycle cost)

Här görs först beräkningen av livscykelkostnader för en konventionell 2-axlig, 12-meters dieselbuss i låggolvsutförande – en typisk buss som används i tätorter (Tabell 25 och Figur 19).

Tabell 25. Förklaring till vilka kostnader som använts till beräkning av LCC-kostnader för en konventionell 2-axlig, 12-meters dieselbuss i låggolvsutförande

Inköpspris	2 500 000	Baseras på enkätsvar från MAN
Ränta		5 % har använts för nuvärdesberäkningarna
Restvärde	375 000	Snitt på begagnade 10 år gamla stadsbussar [exv www.bus-store.se]. Anmärkning: VTT [20] använde restvärdet 0 kr men då användes också bussarna under en längre tidsperiod.
Bränslekostnad och urea	2 886 708 72 800	6 000 mil per år, 4,18 liter per mil, 10 år [se kapitlet om stadsbusstrafik i Sverige samt bränslepriser ovan i detta kapitel] Urea motsvarar ca 2,5 % av dieselförbrukningen, ca 0,1 liter per mil [se ovan och om pris för urea]
Servicekostnad	840 000	1,4 kr per km. VTT-rapport [20], växelkurs 9,5 kr SEK/EUR har använts
Övriga kostnader		Som övriga kostnader avses kostnader för reparationer utöver service och underhåll samt kostnader för skadegörelse (vilket är vanligt inom kollektivtrafiken) i form av sönderslagna rutor, sönderskurna säten, klotter mm. Vi har i detta arbete inte lyckats få reda på dessa kostnaders storlek. Vi antar dock att dessa kostnader är lika stora oberoende av busstyp.



Figur 19. Nuvärdesjusterade LCC-kostnader (SEK) för olika stadsbussar. Bränslepriser inklusive skatter men exklusive moms.

I Figur 19 ovan visas LCC-kostnader för olika bussar. Dyrast blir enligt denna beräkning ED95 och biogas. FAME (biodiesel) är den buss/bränsle-kombination som är billigast ur ett LCC-perspektiv enligt de förutsättningar som tillämpats i beräkningarna (ca 4,8 miljoner). I och med den skattehöjning som gjordes på FAME (RME) i årsskiftet 2014/2015 så har fördelen med FAME vs diesel minskat och ur ett LCC-perspektiv nästan raderats bort.

9.4 Kostnader för föraren

Som jämförelse till dessa LCC-kostnader kan en relation till förarens lön göras. Följande antaganden har gjorts: [antagandena är grova och ska läsas som en fingervisning av vad konstaden för en stadsbussförare kan vara]

Tabell 26. Beräkning av förarens kostnader under bussen total användningstid. Antagandena är grova och mest påverkas beräkningen av val av medelhastighet. Vi har valt 30 km per timme för typisk stadsbusstrafik. I förarens ställtid räknas betald tid för att hämta och ställa tillbaka bussen, möten, utbildning, d.v.s. allt betald tid som åtgår till annat än att köra buss. I beräkningarna ovan så ser man att förarens kostnader är det som dominerar för stadsbusstrafik.

Timkostnad	310 kr
Förarens ställtider	2,5 timmar per dag
Timkostnad justerad för ställtid	455 kr
Bussen medelhastighet	30 km/tim
Körda mil totalt	60 000 mil
Körda timmar	20 000
Total kostnad för föraren	9 100 000 kr

9.5 Exempelberäkning – hybridbussar

En hybridbuss kostar enligt MAN 800 000 kr mer än en konventionell dieselbuss. MAN säger att besparingen i bränsle blir ca 20 – 30 % för typisk drift i stadstrafik och att underhållskostnaden är ungefär den samma eller maximalt 10 % dyrare. Typisk körsträcka för en tvåaxlig stadsbuss i Sverige är 6 000 mil med en medelförbrukning av diesel motsvarande 4,18 liter per mil (4,53 liter per mil för FAME) och att bussarna används i 10 år, (se kapitlet om stadsbussar i Sverige).

Med ett bränslepris på (ex moms)

- Diesel 11,51 kr
- FAME 9,67 kr

Bussarna kommer alltså att köras 60 000 mil totalt och förbrukar

- 250 800 liter diesel eller 271 800 liter FAME

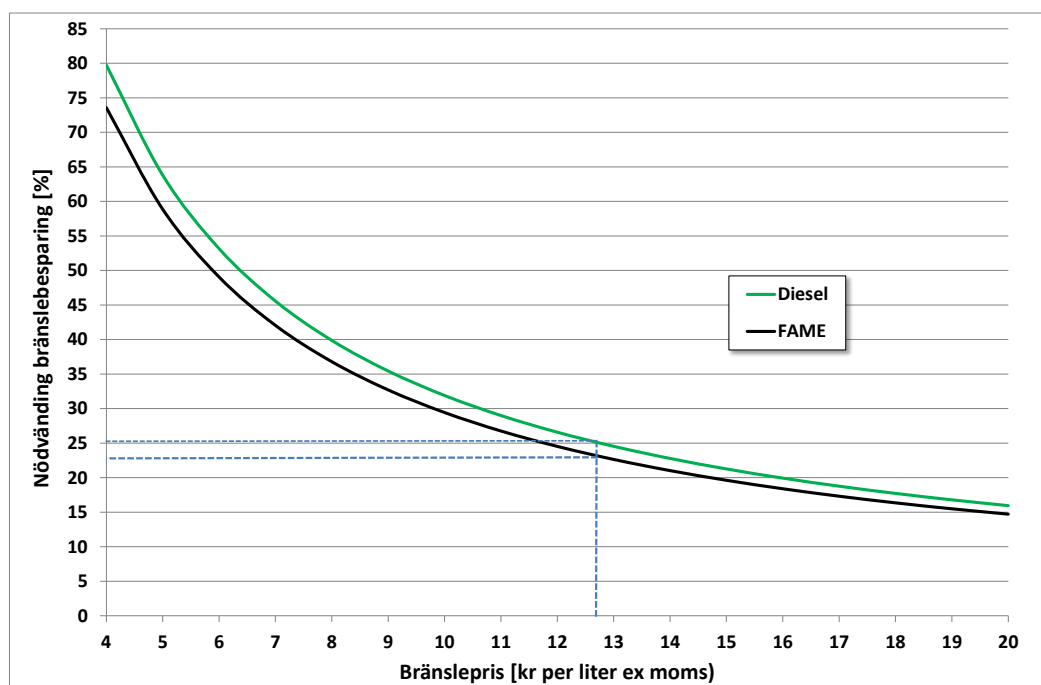
Om man utgår från den en besparing på (25 %) så kommer man om man byter från konventionella dieselbussar till en dito hybrid att spara

- 62 700 liter diesel eller 67 950 liter FAME

Omräknat i pengar motsvarar detta ca (i jämförelse med att hybridbussen kostar 800 000 kr mer)

- 722 000 kr för diesel och 657 000 kr för FAME

Med de antaganden som gjorts här och med dagens bränslepriser så kan man ur bränslesparingsperspektiv inte räkna hem ett köp av en hybridbuss. Om man räknar på att bussarna lever vidare även efter de 10 åren och 60 000 milen (hos ägare 2) som används i detta exempel så lönar det sig definitivt med hybriddriften i båda fallen.



Figur 20. Brytpunkter när det lönar sig att använda en hybridbuss i stället för en dito konventionell buss driven med diesel eller FAME.

Figur 20 visar att ju dyrare bränslet är desto lättare är det att räkna hem en hybridbussinvestering och vice versa. Med de drivmedelspriser som råder idag (januari 2014) så är det svårt att få lönsamhet med avseende på lägre bränslekostnader.

Eftersom lika bra ekonomiskt underlag för beräkning av kostnader för eldrivna bussar som för övriga bussar inte finns redovisas inte elbussar i det här kapitlet utan i stället förs en diskussion om kostnaderna i kapitel 11 ([Framtiden – efter Euro VI](#)) under avsnitt 11.5.

9.6 Kostnader som buller från bussar åsamkar omgivningen, exempel

Baserat på underlag och resonemang i kapitel 8 har beräkningar av kostnaderna för buller utförts för de tre städerna av intresse i den här studien.

9.6.1 Storstadsmiljöer liknande Stockholm, innerstaden

Innerstaden i Stockholm domineras av boende, affärs- och kontorsverksamhet samt många människor i gaturummen. Andra bullerkänsliga verksamheter är skolor, barnstugor, sjukhus, bibliotek, muséer mm. Ett antal större parker finns även, mest på Södermalm. De miljöer där bussarnas buller stör mest omfattande är främst boendemiljöer men även för människor som vistas i gaturummen. Så gott som all bebyggelse består av höga hus i slutna kvarter.

Befolkningsdensiteten för inre staden (Kungsholmen, Norrmalm, Östermalm och Södermalm) är i medelsnitt 9 100 personer/km² (landyta). Där bor 326 000 personer. Norrmalm har densiteten 13 900 personer/km², vilken varierar från 400 till 33 100 personer/km² beroende på församling. Längs busstråken bedöms omkring 1 000 personer bo per km, varav omkring 40 % mot gaturummet.

En grov uppskattning av bussarnas bullerkostnader i innerstaden kan göras med hjälp av typfallen Typ 1 och 4. Omkring 75 % av de boende kan antas bo längs gator med relativt låga trafikflöden medan resten bor längs större gator. Längs busslinjerna antas vidare att 100 personer/km vistas i gaturummen där trafikflödena är låga medan 500 personer/km vistas i gaturum med höga trafikflöden. Med dessa antaganden blir busskostnaderna:

$$K_{\text{Bränsledrift}} = (9100/10000) * (0,75 * 4,91 + 0,25 * 0,77) + (100/500) * 2,91 * 0,75 + (500/500) * 0,75 * 0,25 = 4,15 \text{ kr/km}$$

$$K_{\text{Eldrift}} = (9100/10000) * (0,75 * 1,03 + 0,25 * 0,16) + (100/500) * 0,62 * 0,75 + (500/500) * 0,16 * 0,25 = 0,87 \text{ kr/km}$$

9.6.2 Städer liknande Uppsala

Uppsala tätort domineras av boende, affärs, studie- och kontorsverksamheter, många cyklister och andra människor i gaturummen. Andra bullerkänsliga miljöer är barnstugor, sjukhus mm. Ett antal parker finns även. De miljöer där bussarnas buller stör mest omfattande är främst boendemiljöer. Bostadslägenheterna finns i höga hus i slutna kvarter, kvarterslånga hus i parallella rader och småhus. Fördelningen av boende kan uppskattas till omkring 30, 60 respektive 10 %. Befolkningsdensiteten i bullerutsatta lägen varierar övervägande mellan 2000- 8000 personer/km². Det bor cirka 160 000 personer i tätorten.

En grov uppskattning av bussarnas bullerkostnader i tätorten kan göras med hjälp av typfallen Typ 1, 2 och 3. Omkring 80 % av de boende kan antas bo längs gator med relativt låga trafikflöden medan resten bor längs större gator. Med dessa antaganden kan busskostnaderna bli:

$$K_{\text{Bränsledrift}} = 0,30 \cdot (8000/10000) \cdot (0,80 \cdot 4,91 + 0,20 \cdot 0,77) + 0,60 \cdot (0,80 \cdot 6,62 + 0,20 \cdot 3,39) + 0,10(0,80 \cdot 6,00 + 0,20 \cdot 2,19) = 4,48 \text{ kr/km}$$

$$K_{\text{Eldrift}} = 0,30 \cdot (8000/10000) \cdot (0,80 \cdot 1,03 + 0,20 \cdot 0,16) + 0,60 \cdot (0,80 \cdot 1,57 + 0,20 \cdot 0,89) + 0,10(0,80 \cdot 1,10 + 0,20 \cdot 0,56) = 0,2054 + 0,8604 + 0,0816 = 1,15 \text{ kr/km}$$

9.6.3 Städer liknande Kristianstad

Kristianstad tätort domineras av boende, livsmedelsindustrier och offentlig sektor. Staden är ett naturligt centrum och har en liten stadskärna. Andra bullerkänsliga miljöer är barnstugor och sjukhus. De miljöer där bussarnas buller stör mest omfattande är övervägande boendemiljöer. Bostadslägenheterna finns främst i flerfamiljshus i öppna kvarter och småhus. Fördelningen av boende kan uppskattas till omkring 40 respektive 60 %. Befolkningsdensiteten i bullerutsatta lägen är omkring 2000 invånare/km². Det bor cirka 36 000 personer i tätorten.

En grov uppskattning av bussarnas bullerkostnader i tätorten kan göras med hjälp av typfall- en Typ 2 och 3. Alla boende kan antas finnas längs gator med relativt låga trafikflöden. Med dessa antaganden kan busskostnaderna bli:

$$K_{\text{Bränsledrift}} = 0,40 \cdot (2000/4000) \cdot 6,62 + 0,60 \cdot 3,80 = 3,60 \text{ kr/km}$$

$$K_{\text{Eldrift}} = 0,40 \cdot (2000/4000) \cdot 1,57 + 0,60 \cdot 1,10 = 0,97 \text{ kr/km}$$

Tabell 27. Sammanställning, bullerkostnader för bussar i olika städer, exempel

Miljö och resultat	Storstadsmiljöer liknande Stockholm innerstaden	Städer liknande Uppsala	Städer liknande Kristianstad
Bullerkostnad för buss driven av förbränningsmotor	4,15 kr/km	4,48 kr/km	3,60 kr/km
Bullerkostnad för buss driven av elmotor	0,87 kr/km	1,15 kr/km	0,97 kr/km

9.6.4 Betydelsen av tystare bussar

Sammanfattningsvis kan sägas att vanliga stadsbussar, som går uteslutande på förbränningsmotorer, i genomsnitt kan kosta omkring 4 kr/km i tätortstrafik, medan bussar under framdrift med enbart elmotor kan kosta omkring 1 kr/km. Kostnaderna minskar med cirka 25 % för varje dB tystare buss. En tystare buss kan avsevärt minska de samhällsekonomiska störningskostnaderna i våra städer.

Betydelsen av tystare bussar kan knappast underskattas. Enskilda vanliga bussar kan vara mycket störande. Tystare bussar bidrar därför till en trivsammare stad där människor hellre vill bo, mötas och verka, får ökat välbefinnande och bättre hälsa samt ökad kreativitet och produktion m.m. Fastighetsvärdena kan höjas och skattebortfall samt kostnader för sjukvård minskas. Tystare stadsbussar ökar möjligheterna att förtäta och samtidigt bygga ut kollektivtrafiken i de viktigaste områdena där många vistas. Hållplatser kan placeras mer optimalt utan restriktioner på grund av buller, vilket ökar möjligheten för bussarna att köra i bostads-

områden. Tystare bussar kan också minska behovet av bullerskyddsåtgärder för främst kommunerna. De kan ha mycket högre störningsminskande effekter i förhållande till mer-kostnader jämfört med alternativa åtgärder, t ex bullerreducerande beläggningar. Se [57] och [58]. Totalt sett bör därför utveckling av tystare bussar efterfrågas och stödjas. Tystare bussar kan bli en god affär för alla; staden, medborgarna, näringslivet och fordonsindustrin.

9.7 Summering av kostnader för bussägaren, samt kostnader för miljö och buller

I Tabell 28 summeras kostnaderna för bussägaren. Författarna har valt att *inte* summera kostnaderna för bussägaren och de samhällsekonomiska kostnaderna för miljön, dvs. avgas-emissioner och buller. I skatten på drivmedel kan man förmoda att en del av skatten står för de miljökostnader som bussarna åsamkar samhället. Att summera alla kostnader vore därför att dubbelräkna. En del drivmedel har också nedsatt skatt i förhållande till diesel.

Tabell 28. Summering av kostnader för bussägaren

Kostnadsslag	Enh.	Diesel	FAME	Biogas	ED95	Hybrid	Elbuss
Inköpspris	öre/km	417	417	492	438	550	X
Restvärde	öre/km	-38	-38	-38	-38	-38	X
Bränslekostnad	öre/km	372	338	446	494	279	X
Ureakostnad	öre/km	9	9	0	0	4	X
Servicekostnad	öre/km	108	119	117	140	119	X
Summa	öre/km	867	845	1 016	1 033	913	X

Totalt sett så domineras de rörliga kostnaderna för bussägaren av inköp och drivmedel (Tabell 28). Servicekostnaden är också en stor post. Därför inses lätt att ifall något av fordonen drabbas av högre servicekostnader än andra fordon, så kan det totalt sett ge betydande kostnadsökningar. En post som inte finns med i beräkningen är att längre stillestånd också kostar genom att fler bussar då måste finnas tillgängliga som reserv. Det finns exempel från bl.a. New York där en tidig generation av hybridbussar hade så mycket stillestånd och höga servicekostnader att de helt enkelt byggdes om till konventionella diesalbussar.

I Tabell 28 nedan summeras olika kostnader för bussarna med bl.a. ASEK värden för emissioner och buller. Tre orter har valts för jämförelserna. Kristianstad är referensort för ASEK och dessutom har Stockholms innerstad och Uppsala valts. Tyvärr finns ingen uppdelning på buller separat för de olika bussarna med konventionell förbränningsmotor, då det inte gick att göra. För hybridbussarna har antagits att de 75 % av tiden körs som en buss med normal förbränningsmotor och 25 % av tiden på enbart elmotor. När förbränningsmotorn körs i en hybridbuss antas bulleret (som medel) ligga på samma nivå som för en konventionell buss. Det är naturligtvis fråga om mycket enkla antaganden. Det ger lägre bullerkostnader och förutsättningarna kan diskuteras eftersom hybrider ibland tenderar att bullra med än vanliga

bussar. Ifall de dock kör på enbart el i de mest känsliga områdena borde det ju leda till en minskad belastning av buller, vilket i sin tur borde avspeglar sig i en lägre samhällsekonomisk kostnad.

Tabell 29. Summering av miljökostnader

Kostnadsslag	Enh.	Diesel	FAME	Biogas	ED95	Hybrid	Elbuss
ASEK – Kristianstad							
Partiklar	öre/km	1,1	1,1	3,5	1,5	1,0	
VOC	öre/km	0,2	0,2	1,1	0,4	0,0	
NO _x	öre/km	4,2	4,2	4,2	4,2	5,3	
Buller	öre/km	360	360	360	360	294	97
Summa - Kristianstad	öre/km	365	365	369	366	301	97
ASEK - St:holm, innerst.							
Partiklar	öre/km	5,0	5,0	16,2	7,2	4,5	
VOC	öre/km	0,3	0,3	1,4	0,5	0,0	
NO _x	öre/km	1,8	1,8	0,0	1,8	2,3	
Buller	öre/km	415	415	415	415	333	87
Summa – St:holm, innerst.	öre/km	422	422	433	425	340	87
ASEK - Uppsala							
Partiklar	öre/km	2,3	2,3	7,3	3,2	2,0	
VOC	öre/km	0,1	0,1	0,6	0,2	0,0	
NO _x	öre/km	0,9	0,9	4,2	0,9	1,1	
Buller	öre/km	448	448	448	448	365	115
Summa - Uppsala	öre/km	451	451	460	452	368	115

Som framgått i flera tidigare kapitel är emissionerna väldigt låga för Euro VI bussar (Tabell 29). Följaktligen är det inte förvånande att även miljökostnaderna blir låga. NO_x och partiklar står för de högsta kostnaderna medan kostnaden för VOC med bara två undantag alltid är mindre än ett öre per km.

En enkel beräkning ger både en rimlighetskontroll av kostnader för avgasemissioner och en jämförelse med personbilar. Den brittiska myndigheten VCA listar certifieringar av bilar. Den sista genomgången av den listan gjordes i slutet av oktober. Då fanns 654 dieseldrivna bilmodeller certifierade enligt Euro 6. Av bilarna hade 50 st. ett certifierat partikelvärde på 0 (noll) mg/km. Det är naturligtvis meningslöst att räkna på en sådan siffra. Nästa kategori omfattar 177 bilar och ett värde på 0,1 mg/km. Det är ett exempel på bilar med mycket låga partikelutsläpp men ändå inte extremt lågt då det ju som sagt var finns de som har en lägre nivå. Med ASEK kostnaden för Stockholms innerstad för partiklar motsvarar detta en kostnad på 0,12 öre per km (1,2 öre/mil). Med en årlig körsträcka på 15 000 km blir det 18 kr och 29

öre per år. Den allmänna uppfattningen torde nog vara att miljökostnaden för partiklar, som i det här fallet, är väsentligt högre. Kostnaderna för partiklar från bussar är högre i Tabell 29 än för personbilen i exemplet men tar man hänsyn till antalet passagerare hamnar man ändå i ungefär samma storleksordning.

Som sammanfattning kan konstateras att kostnaderna för buller är väsentligt mycket högre än för avgasemissioner. Exempelvis i Stockholms innerstad står buller för 85 % av den totala ASEK kostnaden för emissioner och buller. Författarna gör ingen värdering av att utfallet blir just detta.

För att komplettera bilden av kostnader för emissioner och buller ovan redovisas också kostnaden för CO₂ (övriga klimatgaser försummas) nedan (Tabell 30). Det kan noteras att kostnader för CO₂ redan ingår i drivmedelspriset för fossila drivmedel genom koldioxidskatten. Det är därför inte relevant att summiera CO₂-kostnaden nedan med kostnaderna för emissioner och buller ovan. Därtill kommer det faktum att koldioxidskatten beräknas på kolinnehållet i drivmedlet vid pump och inte tar hänsyn till utsläpp uppströms, varken för fossila drivmedel eller för biodrivmedel. Som underlag för kostnadsberäkningar av CO₂ utsläpp har ASEK 5.1, lång sikt, använts (1,45 kr/kg) men även värdet för kort sikt (1,08 kr/kg) diskuteras.

Tabell 30. Utsläpp av fossil CO₂ för olika buss/bränslekombinationer under dess användning. Som beräkningsunderlag har för en konventionell 2-axlig, 12-meter dieselbuss följande siffror använts. 10 år, 6 000 mil per år, 4,18 liter per mil samt 2,89 kg CO₂ per liter diesel. Läs mer om beräkningarna tidigare i kapitel 9.

Em/kostn.	Diesel	Diesel-hybrid	FAME	FAME-hybrid	HVO	Biogas	ED95
CO ₂ (fossil) total kg	724 812	543 609	312 394	304 421	137 714	246 436	246 436
CO ₂ (fossil) total kg/km	1,21	0,91	0,52	0,51	0,23	0,41	0,41
CO ₂ (fossil) total kr/km	1,75	1,31	0,75	0,74	0,33	0,60	0,60

Med dagens nivå på koldioxidskatt för dieselbränsolja av miljöklass 1, dvs. 1 833 kr/m³, och en förbrukning på 41,8 liter per km motsvarar den skatten en kostnad på 0,77 kr/km. Räknar man med det lägre värdet från ASEK 5.1 på kort sikt (1,08 kr/kg) i stället för på lång sikt (1,45 kr/kg), skulle kostnaden i för diesel i Tabell 30, i stället bli 1,30 kr/km. För den här fordonskategorin det skiljer alltså en del mellan kostnader för CO₂ enligt ASEK 5.1 och nuvarande beskattning av CO₂ via koldioxidskatten på dieselbränsolja¹⁵.

Med de begränsningar som finns när det gäller jämförbarheten för miljökostnaderna ovan kan man i alla fall konstatera att kostnaden för CO₂ vida överstiger kostnaderna för andra

¹⁵ Det kan tilläggas att den aviserade höjningen av skatten på dieselbränsolja med 48 öre/liter till 2016 avser energiskatt, inte koldioxidskatt.

(reglerade) emissioner från fordonen (observera att emissionskostnaderna i Tabell 29 anges i öre/km, inte kr/km som i Tabell 30). Det illustrerar det som diskuteras på flera andra ställen i rapporten, dvs. att miljökostnaderna för reglerade avgasemissioner numera är praktiskt taget försumbara i förhållande till kostnaderna för klimatgaser och buller.

Skillnaden mellan kostnaderna för buller och CO₂ är mindre än skillnaderna i fallet ovan men likväl är kostnaderna för buller väsentligt högre än för CO₂.

10 INTERVJUER – ENKÄTUNDERSÖKNING

Intervjuer och enkätundersökningar har gjorts med fordonstillverkarna (Volvo, Scania, MAN och Mercedes), huvudmännen (SL, Västtrafik, Östgötatrafiken, Västtrafik och Dintur), operatörerna (Arriva, Keolis, Nobina) samt organisationerna (Sveriges Bussföretag och Svensk Kollektivtrafik). Totalt 14 aktörer inom branschen fick möjlighet att svara på enkätfrågorna. Totalt inkom svar från 11. De som inte svarat är Arriva, Nobina och Skånetrafiken.

Sammanfattningsvis så kan man säga att svaren spretar lite mellan olika aktörer men några "trender" kan ändå hittas.

- Elektrifiering kommer starkt. Nu mest som hybrider men i framtiden troligen som rena elfordon i stadstrafik.
- Biogasen är på tillbakagång på många håll (dock inte alla). Främsta anledningen är den relativt övriga alternativ låga energiverkningsgraden
- Etanol är svårbedömd. Inga nyregistreringar på flera år. Detta kan dock komma att ändras eftersom etanolen ger hög klimatnytta. Fler aktörer har kommit in på bränslemarknaden varför man kan förvänta sig en prispress.
- HVO är det som de flesta vill ha som bränsle. Mycket likt diesel och man får inte de nackdelar som FAME ger i form av bland annat tätare serviceintervall
- Alternativa drivmedel som tidigare diskuterats såsom metanol och DME är det inte många som pratar om längre.

"De nya modeorden 2015 stavas El, hybrid och HVO"

10.1 Frågor som ställts

Tillverkare [TV]

Försäljningsorganisation [FO]

Operatör [OP]

Huvudmän [HM]

Branschorganisationer [BO]

Vilka motorer finns för Euro VI till 2-axliga bussar	TV, FO
Vilka 2-axliga bussar (Euro VI, envånings) har ni i ert sortiment	TV, FO
Lämnar ni ut certifieringsdata – och även förbrukningsdata (g/kWh)	TV

Vad kostar 2-axliga bussar i inköp för er (diesel, ED95, biogas, biodiesel, hybrid)	OP, BO
Vad är driftskostnaden för 2-axliga bussar. Uppdelat på bränsle, - och servicekostnad	FO, OP
Hur långt kör ni per år med 2-axliga bussar	OP
Vad är bränsleförbrukningen per km (eller per passagerar-km)	OP
Vad har ni för mål med stadsbussar med avseende på klimatgaser	OP, HM
Vad är er erfarenhet av olika bränslen (för och nackdelar)	OP, BO
Vad är er framtida strategi (d.v.s. vilken typ av buss/bränsle) satsar ni på (alt väljer bort)	OP, HM
Hur länge använder ni bussarna (årtal eller sträcka) – och vart tar de vägen sedan	OP
Vilka typer av bussar finns i er framtida strategi (typ och bränsle) – efter Euro VI	TV
Bränsle- och ureaförbrukning och körda km för stadsbussar i Sverige	OP, HM
Övriga kringkostnader, t.ex. laddstationer för el- och laddhybrider	OP, HM, BO

10.2 Svar från busstillverkare [TV]

De busstillverkare som fått möjlighet att svara på enkäterna är Volvo, Scania, MAN och Mercedes. Samtliga har svarat.

Slutsatser från tillverkarnas svar

Volvo satsar på att elektrifiera stadsbussarna och tar inte fram motorer för bränslen såsom etanol, gas, metanol eller DME. De alternativa bränslen som kommer i fråga är FAME och HVO.

Scania satsar på flera olika alternativa drivmedel såsom diesel, (CNG/LNG/CBG/LBG), biodiesel, etanol och HVO samt hybriddrift för alla drivmedel och eldrift med induktiv och konduktiv laddning samt renodlad trådbuss

MAN satsar på hybridbussar och säger (via sin hemsida) att gas är det bästa ur ett LCC-perspektiv och i enkäten att biogas är miljövänligare än RME

Mercedes ser inte någon ytterligare utveckling av gasfordon som aktuellt med hänsyn till den låga energieffektivitet, den förväntat snabba utvecklingen av heelelektriska fordon. Vår (MB) bedömning är att heelelektriska stadsbussar kommer vara standardlösningen i nya upphandlingar inom 10 år och att vi inom fem år kommer ha serieproducerade fordon av detta slag. För transportbehov ser vi att den andra generationens förnyelsebara bränslen i form av HVO

10.2.1 Svar från Volvo bussar [Edward Jobson och Jonas Pettersson]

- **Vilka 2-axliga Euro VI-bussar har ni i ert sortiment**

Vi har 10,6 meter och 12 meters stadsbussar med låggolv, låggolv är idealiskt för stadstrafik då det skapar ett bra passagerarflöde i bussen, utan steg, ej att förväxla med lågentré

- **Vilka Euro VI-motorer(och effektnivåer) har ni i ert sortiment**

(MOTORER är det inte lite old school)? Vi erbjuder enbart hybrider i låggolvssegmentet och då är motorspecen rätt oviktig.). Om vi fortfarande pratar om 2-axliga stadsbussar så är det vår 4-cylindriga motor på 240 Hk och 918 Nm och en elmotorn som är på 163 Hk och 800 Nm. Motorerna används tillsammans i kombination bränsle/el beroende på bussens belastning.

- **Lämnar ni ut certifieringsdata – och även förbrukningsdata och CO₂ i g/kWh**

Ja det finns en överenskommelse med UITP med alla busstillverkare att vi skall uppge förbrukningsdata. Vi är skyldiga att uppge förbrukningsdata för tendrar i hela Europa. Certifieringsdata är helt missvisande för hybrider och säger väldigt lite om verkligheten för vanliga diesalbussar. SORT data är något bättre. Och allra helst ger vi statistik på verkliga bussar i samma trafik.

- **Vilka typer av bussar och motorer finns i er framtida strategi (typ och bränsle) - efter Euro**

Vi förutser tre typer av stadsbussar:

- Hybrider för kombinerad regions och stadstrafik
- Plug-in/Electric hybrid för elektrisk drift i staden och hybriddrift i region
- Elektriska bussar för den långsamma stadstrafiken.

Dessa tre typer kommer att existera parallellt under lång tid.

Val av bränsle blir mindre viktigt i och med elektromobiliteten, så länge det är förnyelsebart (baseline): Vi erbjuder både RME och HVO kompatibla motorer. Gas är allt för dyrt och tungt för att effektivt kombineras med elektromobilitet. Energieffektivitet, tyst start och drift, utsläpp av växthusgaser, hälsopåverkande emissioner, möjlighet att integrera med andra transportslag, säkerhetssystem, möjlighet att säkra elektrisk drift med "zone management, möjlighet att sätta hastighet i olika zoner av staden kommer att vara avgörande för framgångar för framtida stadsbussar. I och med elektrifieringen så blir Euro VI och framtida tilläggskrav mindre viktiga.

10.2.2 Svar från Scania [Jonas Strömberg]

- **Vilka 2-axliga Euro VI-bussar har ni i ert sortiment**

En lite odefinierad fråga?

Stadsbussar, LF, LE, Normalgolv, regionbussar, intercitybussar och coacher.

- **Vilka Euro VI-motorer(och effektnivåer) har ni i ert sortiment**

För buss gäller:

250, 280, 320, 360, 410, 450, 490 hk – Diesel

280, 320, 400* hk – Gas (ej dual-fuel, renodlad gasmotor)

280*, 400* hk - ED95 Etanol

320, 360, 450, 490 hk – Biodiesel

* Under utveckling för Euro VI, men ännu ej kommersiellt till salu vid dags dato.

- **Lämnar ni ut certifieringsdata – och även förbrukningsdata och CO₂ i g/kWh**

Nej. För CO₂-reduktion för alternativa drivmedel hänvisar vi till reduktioner enligt EU RED-direktivet om inte bränsleleverantören anger specifikt CO₂-värde för sin egen produktion.

- **Vilka typer av bussar och motorer finns i er framtida strategi (typ och bränsle) - efter Euro VI**

Alla busstyper enligt ovan.

Bränslen: Diesel, gas (CNG/LNG/CBG/LBG), biodiesel EN14214, etanol ED95, HVO.

Hybriddrift för alla drivmedel

Eldrift med induktiv & konduktiv laddning samt renodlad trådbuss

- **Övriga kommentarer som ni vill få med**

Vi saknar utveckling av, incitament och styrmedel för att premiera verklig CO₂-prestanda.

Både i publika/privata upphandlingar och i statliga/kommunala/Trafikverkets riktlinjer och mål. Utan värdering av CO₂-prestanda försvåras 2030-målet om en fossilfri fordonsflotta avsevärt.

10.2.3 Svar från MAN [Alexander Sylwan]

- **Angående FAME**

Det erfordras tätare intervaller om man använder RME

- **Angående servicekostnader för hybrider vs diesel**

Inga stora skillnader eftersom våra hybrider inte har batterier. Kanske +10%

- **Angående priser och förbrukning**

2,5 miljoner för dieselbuss. För hybriden tillkommer cirka 800'000,- . Besparingen ligger runt 20-30% i förbrukning

- **Vilka 2-axliga Euro VI-bussar har ni i ert sortiment**

Stadsbussar: A20, A21, A37, A47 och A78

- **Vilka Euro VI-motorer(och effektnivåer) har ni i ert sortiment**

12-metersbussar: D08 280 hk, D20 280 hk och 320 hk

- **Lämnar ni ut certifieringsdata – och även förbrukningsdata och CO2 i g/kWh**

Vi lämnar ut SORT dokument i samband med att vi offererar

- **Vilka typer av bussar och motorer finns i er framtida strategi (typ och bränsle) - efter Euro VI**

För närvarande känner vi inte till något arbete av typen "Euro 7"

- **Övriga kommentarer som ni vill få med**

Utsläppen minskar genom att tillvarata rötgas och "rena" den i biogasmotorer. På så sätt används och renas metangasen som ändå uppstår. Detta är mer miljövänligt än drift med RME.

10.2.4 Svar från Mercedes [Lars-Olof Gummesson]

För Daimler bussar ser läget ut enligt följande:

Vi producerar i dagsläget:

- Citaro K hellåggolvsbuss 10,5 meter
- Citaro hellåggolvsbuss 10,5 meter
- Citaro LE lågentré buss 12 meter
- Citaro M LE lågentré buss 13 meter
- Setra LE Bussines lågentré buss 12 meter

Bussar är utrustade med vår Dieselmotor OM 936 (hellåggolvsbussar) och OM 936h (lågentrébussar) effekten i dessa motorer är 220 kW. Bränsleförbrukning jämförs ofta genom SORT värden där det finns tre nivåer vilka översatt till svenska förhållanden ser ut enligt nedan.

- SORT I hård stadstrafik med låg snitthastighet exempelvis innerstadstrafik Stockholm.
- SORT II trafik i övriga större svenska städer
- SORT III trafik i medelstora och mindre städer.

För ovan nämnda modeller finns SORT värden framtagna exempel på detta är SORT III värde för Citaro 32,37 l/100 km. Detta kan jämföras med kundfordon som går i en medelstor svensk stad som förbrukar 28 l/100 km. Från min tidigare verksamhet har jag många gånger sett att avvikelserna mellan SORT värden och verklig förbrukning kan vara betydande både åt det positiva och negativa hållet. Under de närmsta åren kommer vi även att kunna leverera ett begränsat antal Biogasfordon 12 och 18 meters utförande. Detta ser vi dock mer som en service gentemot befintliga gasfordonsflottor och inte som en växande marknad. Någon ytterligare utveckling på gasfordon bedömer vi inte som aktuellt med hänsyn till den låga energieffektivitet, den förväntat snabba utvecklingen av helelektriska fordon. Vår bedömning är att helelektriska stadsbussar kommer vara standardlösningen i nya upphandlingar inom 10 år och att vi inom fem år kommer ha serieproducerade fordon av detta slag. För transportbehov ser vi att den andra generationens förnyelsebara bränslen i form av HVO kommer att ta marknaden då vi kan använda en massproducerad motorteknologi, bränslet är stabilt och enkelt att transportera och lagra och inte minst är det ur klimatsynpunkt outstanding endast grön el är lika bra.

10.3 Svar från operatörer [OP]

Av tre operatörer har bara en svarat, Keolis. Arriva och Nobina har valt att inte svara på några frågor. Nobina är en koncern som bedriver sin verksamhet i Norden och Arriva är en av Europas största operatörer av kollektivtrafik. Företaget har verksamhet i 15 länder, 56 000 anställda och ägs av Deutsche Bahn, Tyskland. Keolis bedriver sin verksamhet i hela världen och är en mycket stor operatör av kollektivtrafik. I Sverige hette Keolis tidigare Busslink.

10.3.1 Svar från Keolis [Jan Forsell]

- **Angående körsträckor och förbrukning**

Keolis svarar att deras stadsbussar körs ca 6 000 mil per år och med en snittförbrukning på 4,18 liter diesel per mil.

- **Angående hybridfordon och bränslebesparing**

Vi har aldrig trafikerat city med diesel eller RME normalbuss, däremot har vi kört på etanol. Och jämför vi mot etanol så är bränslebesparingen ca 50 %.

- **Följdfråga om bränslebesparingen med hybriddrift**

”Om man jämför per energienhet så blir det ca 43 % mindre bränsle om man byter från ED95 till diesel (då etanolen innehåller mindre energi per liter). Kan man då säga att eldriften står för de sista 7 % (och att vinsten med att använda hybridbuss är 7 % mindre bränsle?)”

- **Svar på följdfråga**

En buss från 1995 (vilka våra Etanoler var från) och en buss från 2014 är som natt och dag. Bussen från 2014 har AC, Värme, passagerare komfortnivåer, förarmiljö och bullernivåer som inte går att jämföra med gårdagens bussar. Detta är inte gratis och kostar självklart energi. Vi gjorde ett val att investera i Hybridbussar utan några subventioner och helt på kommersiella villkor och fann att detta skulle vara lönsamt och detta ur ett TCO perspektiv. D.v.s. Inköpspris, bränsle förbrukning, underhåll, skatter, restvärde etc. Vi har sen 2012 där det har varit möjligt alltid valt en Hybridlösning vid våra fordonsinköp, tyvärr så är modellutbudet rätt begränsat från dagens fordonsleverantörer. Vi har totalt 82 st Hybrider i våran flotta av 1800 fordon vara alla hybrider är 2-axliga. Ur ett TCO-perspektiv så är hybridfordon det bästa valet för stadsbussar enligt Keolis.

10.4 Svar från huvudmän [HM]

10.4.1 Svar från Västtrafik [Hanna Björk och Andreas Sorthaga]

- **Vad kostar (Euro VI) 2-axliga bussar i inköp för er (diesel, ED95, biogas, biodiesel, hybrid). Om ni inte vill eller kan ange pris så är det även av värde med procentuella skillnader där konventionell dieselbuss sätts till 100 som jämförelse)**

Vi köper inte några bussar själva utan upphandlar trafiktjänster. Det är trafikföretagen som lägger anbud på ett uppdrag som köper in fordon. Vilka fordonspriser som blir finns många faktorer som avgör t.ex. hur man väljer att specia sin buss och antalet bussar man avser att köpa. Västtrafik ersätter trafikföretaget med en fast grundersättning för avtalet samt ersättning för tidtabellstid, km-produktion och fast fordonsersättning. Hur trafikföretaget väljer att fördela sina kostnader mellan dessa parametrar är upp till dem själva. Vi kan därför inte jämföra fast fordonsersättning med vad själva fordonet kostar.

- **Vad är driftskostnaden för 2-axliga bussar. Uppdelat på bränsle, - och servicekostnad (se även ovan med jämförelse)**

Detta är en uppgift som trafikföretagen har som äger fordonen och hanterar tankanläggningarna.

- **Övriga kringkostnader, t.ex. laddstationer för el- och laddhybrider**

Vi har i dagsläget endast två laddstationer som är prototyper och som har testats på linje 60 i Göteborg. Priset för dessa är inte realistiska i förhållande till serieproduktion. Göteborgs Energi är det som stått för denna delen i projektet. Laddstationerna upphandlades och kostnaden var ca tre miljoner styck (de första i sitt slag därmed dyrt) men kostnaden bedöms att gå ner till ca 1 miljon.

- **Vad har ni för mål med stadsbussar med avseende på klimatgaser**

Vi har mål för hela vår trafik, 2025 ska 95 % av personkilometrarna utföras med förnybart drivmedel och det ska gå åt 25 % mindre energi per personkilometer (jämfört med 2010). (Finns fler mål) vi ser att elhybrider/laddhybrider troligen är det alternativet som i framtiden kommer vara lämpligast i stadstrafik, med den tekniken får vi lägre buller också vilket är en viktig stadsmiljöfråga. Västtrafik ägs av Västra Götalandsregionen och följer därmed VGR:s miljömål och krav.

- **Vad är er framtida strategi (d.v.s. vilken typ av buss/bränsle) satsar ni på (alt väljer bort)**

Vi har mål på både energi och förnybart vilket idag inte helt är förenligt med gasdrift, våra biogasbussar drar idag betydligt mer (+30%) än en dieselbuss. Vi ser att HVO är på gång och det blir troligen en framtidslösning och då gärna i kombination med hybrid eller laddhybriddrift. Vi har ställt krav på en viss andel förnybart drivmedel och vi har inte fått in några eta-

noibussar hittills. Branschens nya miljökravsbilaga kommer istället ställa krav på en viss netto-reduktion av koldioxid (-30%, -50% eller -70%), jag tror inte att denna skillnad i krav kommer innebära någon förändring i frågan om etanol, men vi har inte börjat använda bilagan ännu så det är kanske lite tidigt att säga. Eftersom inget trafikbolag hittills själva valt etanol-fordon får man väl förmoda att det blir dyrare trafik med etanoldrift.

10.4.2 Svar från Din Tur [Stefan Valjeesio]

- **Vad kostar (Euro VI) 2-axliga bussar i inköp för er (diesel, ED95, biogas, biodiesel, hybrid). Om ni inte vill eller kan ange pris så är det även av värde med procentuella skillnader där konventionell dieselbuss sätts till 100 som jämförelse)**

Vi vet inte vad bussarna kostar i inköp, eftersom vi själva inte köper in några bussar.. Hybridbussar och Batteribussar har högre investeringskostnad, vi har dock inte tillgång till exakta nivåer. Men trafikföretagen meddelar dubbel kostnad för vanlig batteribuss jämfört med dieselmodellen. Och ett påslag med kanske 25% för hybriderna.

- **Vad är driftskostnaden för 2-axliga bussar. Uppdelat på bränsle, - och servicekostnad (se även ovan med jämförelse)**

Driftskostnaden kan jag inte svara för. Men uppskattad genomsnittsförbrukning av RME är ca 3 liter/10 km för hybridbussarna. Elbussarna har just börjat rulla så där har jag inget svar. Vad övriga komponenter i driftskostnaden är har jag tyvärr ingen vetskap om. Elbussarna körs i Härnösand och Sollefteå.

- *Övriga kringkostnader, t.ex. laddstationer för el- och laddhybrider*

Vi har ingen sådan infrastruktur

- **Vad har ni för mål med stadsbussar med avseende på klimatgaser**

Målsättningen är att minska fossila utsläpp med 90% tom 2020.

- **Vad är er framtida strategi (d.v.s. vilken typ av buss/bränsle) satsar ni på (allt väljer bort)**

Vi satsar på låg energianvändning i kombination med biodiesel av olika slag. Vi väljer bort fordonsgas. Vi hade i senaste upphandlingen höga krav på låg energianvändning vilket innebär att fordonsgas automatisk går bort. Men det hade gått bort även om vi hade ställt vanliga krav eftersom det ej finns någon infrastruktur för detta i vårt län. Vår upphandling var teknikneutral vilket i vårt fall innebar att vi i en tätort fick en blandning av lättviktsbussar + batteribussar för att klara kraven på låg energianvändning. I andra tätorter fick vi enbart hybridbussar. Vad gäller drivmedel så valde vi i en av tätorterna att endast ställa "normala energianvändningskrav" på en andel av fordonen. Syftet var att vi ville möjliggöra för trafikföretaget att använda etanol, då sådana tankanläggningar fanns på depån sedan tidigare.

Trafikföretaget valde ändå att köra RME, då detta anses vara billigare rent driftsmässigt vad jag kan förstå.

10.4.3 Svar från Östgötatrafiken [Eva Skagerström]

- **Övriga kringkostnader, t.ex. laddstationer för el- och laddhybrider**

Vi har inga eldrivna bussar

- **Vad har ni för mål med stadsbussar med avseende på klimatgaser**

Vi har som mål att köra alla våra fordon på förnyelsebara drivmedel, vilket vi troligtvis når juni 2016. Redan idag kör alla bussar som är stationerade i Linköping och Norrköping på 100% biogas.

- **Vad är er framtida strategi (d.v.s. vilken typ av buss/bränsle) satsar ni på (alt väljer bort)**

Vi har inriktningen biogas så långt möjligt och därutöver krav på förnyelsebara drivmedel. D.v.s., förutom biogasen, ingen prioritering men däremot krav på minskad CO₂-reduktion för drivmedlet.

10.4.4 Svar från Stockholms Lokaltrafik [Maria Övergaard]

- **Vad har ni för mål med stadsbussar med avseende på klimatgaser**

I nuläget är andelen förnybar energi i kollektivtrafiken 80 %. Målen för åren:

- 2020 = 90 %
- 2030 = 100 %

Vidare ska energianvändningen i kollektivtrafiken med 2007 som basår minska med

- 2020 = 25 %
- 2030 = 35 %

- **Vad är er framtida strategi (d.v.s. vilken typ av buss/bränsle) satsar ni på (alt väljer bort)**

Satsning på förnybara drivmedel. Drivmedel som produceras av avfall prioriteras. I SL-trafiken kör idag 328 biogasbussar och landstingets trafikförvaltning har investerat i biogas-anläggningar för dessa. I framtiden ser vi en övergång till eldriven busstrafik.

10.5 Svar från branschorganisationer [BO]

10.5.1 Svar från Svensk Kollektivtrafik [Leif Magnusson]

Svensk Kollektivtrafik är en bransch- och serviceorganisation för våra aktiva medlemmar - länstrafikbolag och regionala kollektivtrafikmyndigheter.

Ungefärligt inköpspris för dieseldrivna tvåaxlade stadsbussar är 2 mnkr och 3 mnkr för en ledbuss. Dessa priser varierar dock mellan olika leverantörer och specifikation av fordonen. Merkostnaden för motsvarande gasdrivna bussar är 200 000 – 300 000 kr. Buss som drivs av diesel och buss som drivs av biodiesel är ju samma buss med olika bränslen. I Euro VI-utförandet finns det dock ett begränsat utbud eftersom tillverkaren måste certifiera fordonet för det bränsle de godkänner det för och flera tillverkare ser nackdelar med framför allt RME. Ett alternativ som är allt mer aktuellt är HVO som i 100 % ligger väldigt nära vanlig diesel i sin specifikation, och tillverkarna är generellt positiva till att godkänna även nya bussar för detta bränsle, men det är lite procedurer kring godkännandena vilket gör att det drar ut något på tiden. Vår erfarenhet i Göteborg säger ca 30 % besparing av bränsle vid användning av vanlig hybridbuss. Men detta kan variera med topografi, trafikmiljö och förarbeteende. Det där med framtiden för gas- och etanolbussar är en svår fråga. Och svaret beror mycket på vad man redan satsat på. Det kan vara rimligt att hålla fast vid biogas om man gjort stora investeringar i både fordon men framför allt produktion och tankanläggningar och lager. Även om en kollektivtrafikmyndighet/länstrafikbolag inte äger produktionen har man ofta politiskt gjort åtaganden som rent moraliskt förpliktigar. Om jag däremot försöker se det strikt sakligt ur kollektivtrafikens synvinkel och med det uppdrag som vi har i Västsverige kommer jag just nu till en annan slutsats. Vi utgår från våra mål som också överensstämmer med rekommendationen i det branschgemensamma Partnerskapet för en förbättrad kollektivtrafik. Dessa mål är

- att minska nettoutsläppet av CO₂ från ca 40 g till 8 g/personkilometer för hela kollektivtrafiken inklusive eldriven spårtrafik. För busstrafiken innebär det en minskning på minst 80 % jämfört med användning av fossil diesel.
- minska energianvändningen för all kollektivtrafik från ca 0,20 kWh/pkm till 0,15 kWh/pkm
- minska bullret.

Biogasen stöder det första men inte de två andra målen.

Däremot ser vi nu att HVO verkar komma starkt. Enligt Energimyndigheten uppvisar HVO faktiskt bättre minskningsvärde för CO₂ än vad biogasen gör i genomsnitt. Om man då också beaktar att biogasbussar drar ca 30-40 % mer energi än vanliga dieselbussar i stadstrafik och ungefär dubbelt så mycket som dieselhybrider som också kan köras på biodiesel eller HVO så får vi bättre utsläppsminskningar med HVO än med biogas och dessutom bibehållen energi förbrukning. Eller sänkt förbrukning om man använder hybrider. I regiontrafik verkar det

som att förbrukningsskillnaden gas-diesel inte är lika stor, så det är möjligen i den trafiken som biogasen kan ha en framtid. Givet att det kommer att finnas tillräckliga volymer av HVO för kollektivtrafiken är detta det bränsle jag tror är lämpligast för det mesta av kollektivtrafiken med buss, så mycket som möjligt i hybridfordon, i brist på HVO och RME. För innerstadstrafik, elektrisk drift. De krav vi nu rekommenderar i Partnerskapet går egentligen ut på att beställaren inte ska välja drivmedel utan bara tala om vad som ska uppnås och så överlåta åt trafikföretaget att välja teknik. För eldrift ser vi det dock som nödvändigt att beställaren definierar teknik och säkerställer en infrastruktur för laddning av fordonen. Etanol för bussar är en nisch som egentligen bara används av Stockholm såvitt jag vet. Med den Partnerskapets rekommenderade miljökrav så kan man möjligen tänka sig att etanol kan vara ett alternativ om bränslepriset är tillräckligt lågt och man kan dokumentera ett högt minskningstal för utsläpp av klimatgaser.

10.5.2 Svar från Sveriges Bussföretag [Lars Annerberg]

Sveriges Bussföretag är ett gemensamt förbund för busstrafikföretag och bussreserangörer som bedriver alla former av yrkesmässig busstrafik och anordnar bussresor inom och utanför landets gränser.

När det gäller bränslen är det starkast på frammarsch de senaste åren RME. Framst pga. dess pris och att det uppfyller kravet om förnybarhet. Nackdel är tätare serviceintervall och vissa problem med kallare temperaturer. Biogas, förekommer enbart då det är krav på biogasbussar, eller krav på förbrukning av biogas i avtal. Dess nackdel är att det är tätare serviceintervall och betydligt högre energiförbrukning jfr en vanlig dieselbuss (c:a 30 % högre). Ett starkt kommande drivmedel är HVO som har den stora fördelen att befintlig infrastruktur kan användas, man erhåller dieselmotorns energieffektivitet och kombinerar den med hybrid, laddhybrid så uppnås en klimatnytta som tom slår biogasen. Viktigt i detta sammanhang är vad som läggs in i förslag till ny kvotpliktslag som är tänkt att presenteras våren 2015. Skulle förslaget innebära att leverantörerna inte skulle klara erbjuda våra företag höginblandade drivmedel, då blir det problem.

11 FRAMTIDEN – EFTER EURO VI

Denna studie ger en "ögonblicksbild" av situationen i dag vad gäller emissioner och bränsleförbrukning för ett antal bussar. När man diskuterar framtida teknik som t.ex. bränslecell-drivna bussar eller elbussar måste man beakta att den tekniken ännu inte är färdigutvecklad. När tekniken – förmodligen om några år – är mogen för en storskalig kommersialisering kommer också den konventionella tekniken att ha utvecklats vidare. Det är som att skjuta mot ett rörligt mål. När det gäller hybrider och laddhybrider har de nyligen nått en nivå där storskalig kommersialisering inletts, eller står för dörren.

11.1 Konventionella dieselbussar

Som tidigare konstaterats i den här rapporten är den dieseloljedrivna dieselmotorn "referensen", dvs. den som alla andra koncept för drivmedel/motor/drivsystem jämförs med. Man kan också hävda att kommande krav för emissioner kommer att sättas efter vad som är möjligt att åstadkomma med dieselmotorer. Krav kommer sannolikt också på ett eller annat sätt att ställas på minskad bränsleförbrukning, CO₂ och/eller ökad effektivitet. Sådana krav finns redan för CO₂ från personbilar och gäller då som medel för alla producerade bilar. En indikation om potentialen för minskning av bränsleförbrukningen i framtiden visades redan i kapitel 4 (Tabell 7) och berörs inte mer här.

När det gäller avgasemissioner kan man först konstatera att icke-reglerade hälsofarliga emissioner redan reducerats till en nivå där de knappt är mätbara. Som noterats i ACES-studien får råttor inte längre cancer även när de exponeras för mycket höga nivåer av dieselavgaser. Det var US 2007 motorer; US 2010 motorer är mycket renare, liksom även Euro IV motorer. Förmodligen skulle fler emissionskomponenter kunna föras över från listan över "icke-reglerade" till "reglerade" i framtiden med syfte att minska hälsoeffekterna. Detta är någonting som samhället kan göra ifall det exempelvis kommer fram data över hälsoeffekter som kanske inte uppmärksammats tidigare. Det är dock inte särskilt troligt att listan över reglerade emissioner kommer att utökas mycket mer. Detta helt enkelt eftersom de avgaskrav som införts fram till Euro VI inte bara minskat reglerade emissioner utan även icke reglerade emissioner.

Under de diskussioner mellan bl.a. europeiska myndigheter och tillverkare av motorer till tunga fordon som föregick införandet av Euro VI fanns fyra olika nivåer (A-D) på förslag [59]. En möjlighet som övervägdes var att en av dem skulle kunna bli nästa steg, dvs. en gräns som skulle kunna benämnas Euro VII. Av olika skäl, bl.a. tidsskäl, sattes inget gränsvärde för Euro VII utan man nöjde sig med att sätta gränser för Euro VI.

En möjlighet att uppskatta teknisk potential är att jämföra gränser satta för lätta fordon respektive motorer till tunga fordon. Ett sätt att göra detta är att jämföra emissionsindex, dvs. emission dividerat med bränsleförbrukning. Dessa dimensionslösa tal kan jämföras mellan

lätta och tunga fordon. För att räkna om emissionsgränserna till emissionsindex (EI) har enkla ansatser om bränsleförbrukning för motor respektive fordon valts. Bussmotorn förutsätts ha samma verkningsgrad på 36 % som förutsatts i andra beräkningar i denna rapport. Det är likvärdigt med en specifik förbrukning på 234 g/kWh dieselolja. En dieseldriven personbil förutsätts förbruka knappt 5 l/100 km, eller 4 kg diesel per 100 km. Med emissionsgränser för Euro 6/VI erhålls som resultat att emissionsindex för NO_x för *båda kategorierna* ligger på 2,0 g NO_x per kg förbrukat bränsle. Motsvarande värden för PM blir 43 mg/kg för bussmotorer, respektive 125 mg/g för lätta fordon (notera skillnaden i sort). Siffrorna är förstås bara indikativa eftersom analysen bl.a. inte tar hänsyn till olika driftsförhållanden, t.ex. körcykler, eller att vikten och därmed förbrukningen för en personbil exempelvis kan ligga dubbelt högre än i exemplet. Stora skillnader kan diskuteras medan mindre bör försummas. Jämförelserna ger i alla fall ingen indikation till att tekniknivån för lätta fordon skulle vara högre och att ny teknik därmed också enkelt skulle kunna tillämpas även på motorer till tunga fordon.

I teknikkapitlet diskuterades användning av EGR i kombination med SCR, samt annan teknisk utveckling som skulle kunna ge lägre NO_x emissioner än dagens Euro IV nivå. För lätta fordon finns även en teknik som innebär lagring av NO_x i katalysatorn som alternativ till SCR. Utan att gå in på eventuella för- och nackdelar med den tekniken finns förstås möjlighet att kombinera denna teknik med SCR och den NO_x-lagrande katalysatorn ersätter då oxidationskatalysatorn. Det är en teknisk möjlighet att klara kommande hårdare avgaskrav för lätta fordon i USA. När det gäller PM är indikationen här att nivån för motorer till tunga fordon är lägre än för lätta fordon. Detsamma gäller också för PN, som dock inte diskuteras vidare här. För PM tillkommer också det praktiska problemet att mätmetodiken inte räcker till för lägre nivåer. För både lätta och tunga fordon måste konstateras att PM och PN emissionerna är så låga att motiven för ytterligare sänkningar är svaga. Äldre typer av fordon står för de stora utsläppen och när det gäller större partiklar tillkommer också slitagepartiklar från kontakten mellan däck och vägbana.

Sammantaget kan konstateras att tekniska möjligheter för att ytterligare sänka NO_x emissioner finns. Beroende på tidshorisont för en tänkt Euro VII gräns skulle en faktor kring 2-4 kunna vara möjlig. I Kalifornien diskuteras också emissionskrav för motorer till tunga fordon som skulle vara än mer långtgående. Viktigare är kanske att se till att emissionerna i "verklig" trafik blir låga och att avgasreningens hållbarhet under fordonets livslängd säkras. Detta tycks också vara EU:s mål på kort sikt. En möjlighet att uppnå målet är att införa krav för ombordmätningar (PEMS). På längre sikt skulle (hypotetiskt) flera "nya" emissionskomponenter också kunna regleras, ifall nya medicinska rön pekar på behoven av detta. Som ovan konstaterats, bl.a. från resultat i ACES-rapporten, tycks dock även hälsofarliga emissionskomponenter ha minskat kraftigt som följd av att emissionskraven för reglerade emissioner skärpts. Därför kanske inte heller några större behov kommer att finnas av att reglera många fler emissionskomponenter, i alla fall inte sett till hälsoeffekter.

Det förtjänar att nämnas att bussar drivna med FAME eller HVO kommer att ha snarlika emissioner jämfört med konventionella dieseldrivna bussar.

11.2 Biogasbussar

Användningen av trevägskatalysator har inneburit ett steg tillbaka för bränsleförbrukningen för gasbussar. I denna studie har en del åtgärder att motverka detta diskuterats.

Emissionskraven för diesel kommer framgent att vara styrande även för gasdrivna bussar. Emissionerna av CO och HC är högre än för diesel men de kraven kommer knappast att skärpas. När det gäller NO_x emissioner ser man att nivåerna för tillfället är ganska lika för både gas och diesel men det gäller med de brasklappar som diskuterats i tidigare kapitel angående körmönstret. Möjligen kan gas vara bättre än diesel i en tät innerstadsmiljö, vilket ju indikerats av tester på äldre bussar. Det är dock lite svårt att hävda att detta gäller även för Euro VI bussar då inga mätningar finns för sådana bussar. Generellt finns även tekniska möjligheter att minska NO_x emissionerna från gasdrivna bussar. Potentialen här torde ligga i samma storleksordning som för dieseldrivna motorer. Det är också rimligt att tro att samma emissionskrav för NO_x skulle införas för alla typer av drivmedel.

De resultat som nu finns tillgängliga tyder på att partikelemissionerna från gasdrivna bussar kan vara något högre än från dieseldrivna Euro VI bussar. Sammansättningen av partiklarna kan också diskuteras. Ett partikelfilter "stoppar" den aska som härrör från smörjoljan medan sådana ämnen kommer ut i avgaserna från gasdrivna fordon. Av miljöskäl vore det därför rimligt att samma krav som för diesel gäller även gäller även för andra drivmedel. För närvarande finns t.ex. inget gränsvärde för antal partiklar från gasdrivna motorer. Det är rimligt att sådana krav införs i framtiden. Huruvida det innebär att gasmotorerna då också utrustas med partikelfilter får framtiden utvisa.

11.3 Etanolbussar

I dag marknadsförs ingen etanoldriven Euro VI buss. Som nämnts ovan anser författarna att det är tekniskt möjligt att klara Euro VI kraven. Det är också möjligt att nå längre med tekniken. Författarna avstår dock från en sådan diskussion med hänvisning till det ringa intresset från kunderna för tillfället.

11.4 Elhybridbussar

Hybridtekniken är fortfarande tidigt i utvecklingen. I dag är hybrid synonymt med elhybrid men även andra typer av hybridiseringar kan vara intressanta i framtiden.

De data som diskuterats i denna rapport visar ett stort spann för bränsleförbrukningen för hybrider. I vissa fall finns ingen förbättring alls, i andra fall är den förhållandevis stor. Skillnader mellan hybridfordon har diskuterats och där en del av dessa skillnader visar potentialen

att minska bränsleförbrukningen om tekniken utnyttas på bästa sätt. En siffra på 25 % förbättring är en konservativ skattning men har valts i denna studie som en någorlunda representativ siffra för de fordon som erbjuds i dag. En ytterligare förbättring på uppemot 10 procentenheter till kan säkert vara möjlig på relativt kort sikt. Minst lika viktigt är att bussarna sätts in i körmonster där hybridiseringen kommer bäst till sin rätt. Fordonstillverkarna borde kunna tillhandahålla verktyg för att visa detta. En grov skattning av den potentialen ger redan de resultat som redovisats i denna studie.

När det gäller inverkan av hybridisering på emissionerna är resultaten tvetydiga. Först kan man åter påminna om att enbart motorn certifieras enligt kraven i Euro VI. Det ger ingen indikation överhuvudtaget om huruvida emissionerna från hybridbussen är lägre eller högre än från en konventionell buss. En del av minskningen av bränsleförbrukningen kommer från tillvaratagandet av bromsenergin. Den är förstås "gratis" och borde i sig innebära en viss emissionsmässig fördel. Dock kan andra parametrar vara av betydligt större betydelse, t.ex. i vilken mån transienta effekter påverkar emissionerna. Hybridisering innebär också en förskjutning av lasten på motorn, vilket kan ge sänkning av den specifika bränsleförbrukningen utan motsvarande positiva effekt för exempelvis specifika NO_x emissioner. Det går alltså inte att säga att en minskning av bränsleförbrukningen med exempelvis 25 % generellt skulle ge samma minskning av emissionerna. Författarna har också tittat på chassidynamometermätningar med bussar. För vissa emissionskomponenter kan hybridiseringen vara positiv, för andra inte. Inverkan är också olika i olika körcykler. Rent teoretiskt skulle hybridiseringen kunna ha en del egenskaper, t.ex. en högre temperatur för avgasefterbehandlingen, som i sin tur borde ge lägre emissioner genom ökad omsättning i katalysatorn. Någon möjlighet att kvantifiera detta finns inte ännu. Därför bör den konservativa slutsatsen vara att *hybridisering för närvarande inte har någon väsentlig inverkan på emissionerna*.

I dag erbjuder bara de stora busstillverkarna hybridfordon med dieselmotorer. Det är emellertid fullt möjligt att kombinera hybridisering även med motorer för andra drivmedel och där förbränningsmotorn t.ex. är en ottomotor. Så är fallet för lätta fordon där bensinhybrider dominerar men där dieselhybrider nu börjar komma på bredare front. Den relativa potentialen till förbättring av bränsleförbrukningen med en ottomotor borde vara något större än för en dieselmotor. Orsaken är att verkningsgraden vid låga laster är sämre för en ottomotor än för en dieselmotor och att den förstnämnda därför gynnas mer om medelbelastningen kan ökas via hybridisering.

Den naturliga "förlängningen" av hybridtekniken är att gå till en laddhybrid. Dock krävs betydligt större batterier med ökade kostnader och vikt som följd. Kombination med snabb-laddning är också en möjlighet till förbättring. Kostnadsaspekten är dock viktig och det är inte klart ifall kostnad och nytta står i proportion till varandra.

11.5 Eldrivna bussar

Den stora "besvikelsen" i den här studien är att data i stort sett sakas för eldrivna bussar. I klartext är det som avses här eldrivna bussar som levereras av någon av de större tillverkarna. Utan tvekan kommer ett sådant underlag att finnas om några år¹⁶. När mer tillförlitliga data är tillgängliga finns skäl att upprepa delar av den här studien för att på ett rättvisande sätt kunna jämföra eldrivna bussar med konventionella bussar. Eftersom författarna inte kunnat få tag på data av samma kvalitet för eldrivna som för konventionella bussar har vi valt att redovisa elbussarna separat.

Genom avsaknaden av relevanta indata kan endast en del enklare överslagsberäkningar göras. Syftet har varit att komma fram till vilka kostnadsmål för olika delposter som måste nås för att elbussar ska kunna vara konkurrenskraftiga med konventionella bussar. Det förtjänar att nämnas att det här bara är fråga om grova uppskattningar. Något bra experimentellt underlag med verifierade kostnader har inte hittats utan det som finns att tillgå är simuleringar eller beräkningar. Det har legat utanför ramarna för denna studie att ta fram underlag och utföra sådana simuleringar, så författarna har valt att använda data från litteraturen kombinerat med några egna antaganden. En av de bästa – och för svenska förhållanden mest relevanta – studier som hittats i litteratursökningen är en studie från VTT i Finland av Pihlatie m.fl. [60]. Det mesta av underlaget för våra beräkningar har hämtats från denna studie.

11.5.1 Elpris

För elpriset har vi använt medelpriset för rörligt elpris för "Energimix" under 2014. Under detta år var elpriset relativt konstant. Priserna följer svängningarna på Nord Pool, den nordiska elbörsen. Sverige är indelat i 4 elområden. Vi har valt att använda statistik från elområde 3, södra Mellansverige. Vidare har vi använt priser som motsvarar elpriset för ett hushåll med hög elkonsument. Sedan kan givetvis operatörerna analogt med resonemanget för drivmedelspriser få olika typer av rabatter. Medelpriset för 2014 var 68,84 öre/kWh (inklusive energiskatt på 29,40 öre men exklusive moms). På senare tid har elpriset sjunkit rejält och i mars var priset nere på 56,31 öre/kWh. Pihlatie m.fl. använder ett elpris på 0,10 €/kWh, eller motsvarande nära 1 kr/kWh i sina beräkningar i basfallet (pessimistiskt: 0,13 och optimistiskt: 0,07 €/kWh) [60].

Det bör noteras att drivmedel och el beskattas helt olika. Energiskatten på dieselbränslen tillhörande miljöklass 1 ligger på 1,833 kr/liter och därtill kommer en koldioxidskatt på 3,218 kr/liter, dvs. summan blir 5,051 kr/liter. Med hänsyn till energiinnehållet för miljöklass 1 diesel (9,8 kWh/liter) blir skatterna 18,70 öre/kWh i energiskatt och 32,84 öre/kWh i koldioxidskatt, dvs. totalt 51,54 öre/kWh. I en samhällsekonomisk beräkning skulle man givetvis rensa alla kostnader från bl.a. skatter, avgifter, incitament mm. Här räknar vi emellertid

¹⁶ Som bekant jobbar t.ex. Volvo på en eldriven buss.

kostnader för bussägaren och då tas skatterna med oavsett om det är en "rättvis" jämförelse eller ej mellan drivmedel och el.

11.5.2 Övriga förutsättningar

Det är inte bara elpriset som har betydelse för kostnaderna för elbussar utan en mängd andra parametrar kommer också in. En mycket viktig förutsättning är att man ska kunna nå en lika lång körsträcka med elbussar som med konventionella bussar och att det t.ex. inte krävs mer förartid för att åstadkomma detta. Som noterats i avsnitt 9.4 (sidan 86) är kostnaden för föraren en stor post. Skulle det t.ex. förhålla sig så att bussen måste stå still under perioder av dagen (t.ex. under laddning) och att föraren inte kan köra bussen under dessa stopp ökar kostnaden för föraren väsentligt, liksom även inverkan av kapitalkostnaden. Kapitalkostnaden för en elbuss med batterier och infrastruktur för laddning är redan i utgångsläget mycket högre än för en konventionell buss. Skulle den årliga körsträckan bli mycket kortare än för en konventionell buss slår denna kostnad ännu högre på totalkostnaden per körd kilometer.

Vi har här räknat med samma årliga körsträcka som för en konventionell buss och förutsätter också att det inte behövs fler mantimmar för att köra bussen, eller någon övrig hantering förutom normal service för den delen. Författarna är väl medvetna om att elbussar i dag inte klarar detta kriterium och att det i dag närmast ter sig som en utopi att nå dit inom de närmaste åren. Statistik för de fåtal elbussar som finns i trafik i dag pekar på kanske bara halva den årliga körsträckan jämfört med dieselbussar men dessa data är knappast representativa för en mer "mogen" elbuss i framtiden. Det här är ungefär som den "klassiska" jämförelsen mellan bensin- och dieslbilar samt mellan de båda nämnda biltyperna och elbilar. Dieselbilen är dyrare i inköp än bensinbilen men genom den lägre bränsleförbrukningen i dieselfallet kan de ägare/användare som har en längre årlig körsträcka kompensera för den högre inköpskostnaden. Med eldrivna bilar är det dock så att *både* inköpspriset är högre *och* den praktiskt möjliga körsträckan är kortare än för bensinbilen; inte direkt någon "win-win" situation, alltså. Det krävs väsentligt lägre driftskostnader för att kompensera för dessa båda nackdelar. Lite av samma dilemma finns också för elbussen.

Författarnas kalkyler har, utöver samma körsträcka, använt ytterligare några viktiga förutsättningar i kalkylerna, bl.a.:

- Tillförlitligheten förutsätts vara densamma som för dieselbussar
- Batterierna förutsätts hålla i 10 år och byts inte ut under perioden
- Restvärdet sätts till noll efter 10 år (under antagandet att t.ex. batterierna är slut då), till skillnad mot konventionella bussar som antagits ha ett visst restvärde även efter 10 år
- Servicekostnaden är densamma som för hybridbussar, dvs. 10 % högre än för en konventionell dieselbuss

I övrigt har författarna antagit samma kostnader som i VTT-rapporten förutom på några få punkter som diskuteras nedan.

I VTT-rapporten har en Euro VI dieselbuss en kostnad på 0,85 €/km medan den här studien gett en kostnad på 8,67 kr/km. En del av de ekonomiska förutsättningarna är något olika men en växlingskurs på 10 kr per € har använts i stället för den aktuella växlingskursen för att i viss mån ta hänsyn till att VTT med dagens växlingskurs skulle ha något lägre kostnader för sin Euro VI dieselbuss. Växlingskursen 10:1 har alltså använts för samtliga kostnader för data från VTT-rapporten.

Författarna har använt scenariot 1B i VTT-rapporten som bas. Batterikostnaden har använts "rakt av", vilket med nämnda växlingskurs ger en batterikostnad på 1,68 Mkr per buss. VTT förutsätter en enenergianvändning på 0,65 kWh/km för framdrivning till en buss av den här typen. Ett påslag för hjälpaggregat erhålls genom att VTT ansätter en delverkningsgrad på 95 % för hela systemet och på samma sätt förhåller man sig till ett antal parametrar (exv. ökad vikt mm). Till det kommer 0,2 kWh/km som behövs för värmning och konditionering av bussen (som medel under året), dvs. totalt 0,85 kWh/km. Det energibehov för att driva fram en buss (ifall verkningsgraden i drivsystemet vore 100 %) som författarna använt i föreliggande rapport ligger på 1,475 kW/h. Det är inte riktigt jämförbart med 0,65 kWh/km, eftersom även den konventionella bussen har en del hjälp- och komfortsystem som ju ligger i denna siffra. Dock har ju en buss med förbränningsmotor tillgång till spillvärme för uppvärmningen, vilket inte är fallet för elbussen¹⁷. Den mest betydelsefulla skillnaden i förutsättningar mellan de olika studierna vad gäller energianvändning torde vara den regenerativa bromsningen, en energi som ju en konventionell buss inte kan tillgodogöra sig. Skillnaden kan dock knappast vara så stor som mellan nämnda värden (0,65 jfr. med 1,475 kWh/km), även om man skulle ta hänsyn till övriga skillnader, som t.ex. hjälpaggregat mm. Det måste alltså också finnas andra skillnader men någon djupare analys har inte författarna gjort. Vi kan bara konstatera att VTT:s siffror tycks optimistiska. De resultat som redovisas i BTH-rapporten tyder också på en högre elförbrukning än den som VTT redovisar [2]. Sannolikt ligger de största skillnaderna mellan de tre studierna i den körcykel som förutsatts i respektive studie.

Med de verkningsgraden som VTT förutsatt för drivsystemets komponenter, hjälpaggregat, laddare, samt compensation för ökad vikt p.g.a. batterier och förstärkning av chassit erhöles en förbrukning av el från elnätet på 1,24 kWh/km (effektiv verkningsgrad på 68 % i hela systemet). Vi har förutsatt marginellt lägre verkningsgrader för några komponenter i drivsy-

¹⁷ Det mesta av spillvärmens från en elbuss är inte "högvärdig" dvs. temperaturen är för låg för att användas till värmning av bussen och dessutom räcker inte värmen till på långa vägar ändå. Det finns nog också ytterligare några mindre skillnader men en diskussion om dessa försummas här.

stemet (93 % i stället för 95 % för elmotorn och 92 % för batteriet i stället för 94 %)¹⁸. Det ger en förbrukning på 1,31 kWh/km jämfört med VTT:s 1,24 kWh/km. Med dessa förutsättningar skulle kostnaden för el bli drygt 54 000 kr/år. Det är en förhållandevis låg kostnad och kan jämföras med en dieselbuss där kostnaden för bränslet ligger på knappt 290 000 kr.

Priset för en laddstation är 200 000 kr och den förutsätts betjäna en buss och ha en livslängd på 10 år. Vi har förutsatt samma årliga servicekostnad för laddstationer som VTT, dvs. 30 000 kr/år.

11.5.3 Kostnader för elbussar

Med förutsättningar enligt ovan kan man räkna ut hur hög den *maximala kostnaden för en elbuss kan bli för att den ska vara ekonomiskt konkurrenskraftig med en konventionell dieselbuss*. Det skulle bli 1,96 Mkr för en buss *utan batterier*. Läger man till kostnaden för batterierna på 1,68 Mkr erhålls en totalkostnad på 3,64 Mkr. En konventionell dieselbuss kostar 2,5 Mkr. Som jämförelse har vi också kostnaden för hybridbussen som ligger på 3,3 Mkr *inklusive* batterier. Det är knappast troligt att en elbuss med komplett drivsystem förutom batterier kan erbjudas under 2 Mkr i dag. Beräkningarna i VTT rapporten för det scenario som använts som underlag här gav också en högre totalkostnad än för en konventionell dieselbuss [2]. Med mer optimistiska antaganden för elbussen blev dock skillnaden mindre. En observation i sammanhanget är att VTT räknat med 10 % högre bränsleförbrukning för en dieselbuss som uppfyller Euro VI än en som uppfyller Euro V. Enligt diskussionen i kapitlen 4 och 6 har föreliggande rapports författare antagit att bränsleförbrukningen *inte* är högre för Euro VI än för Euro V. Bränsleförbrukningen har en stor inverkan på totalekonomin och detta illustrerar än en gång hur viktiga förutsättningar och antaganden är.

Det finns alltför många variabler, förutsättningar och osäkra kostnader för att kostnadsuppskattningar av det här slaget skall kunna ge något tillförlitligt underlag. Kanske kan beräkningarna ge en *indikation* om vid vilket inköpspris elbussar skulle kunna bli ekonomiskt konkurrenskraftiga. De beräkningar som gjorts i denna studie tyder på att elbussarna ännu inte är ekonomiskt konkurrenskraftiga jämfört med konventionella bussar. Kanske kan laddhybrider vara en kompromiss som har som åtminstone på överskådlig sikt har lättare att nå lika bra kostnadseffektivitet som konventionella bussar. Andra möjligheter kan vara snabbaddning vid exempelvis ändhållplatser och depåer, vilket i sig skulle kunna innebära att bussarna klarar sig med en lägre batterikapacitet. Det för dock med sig ökade infrastrukturkostnader. Någon enighet om vilket alternativ bland eldrivna bussar som är det mest fördelaktiga tycks i alla fall inte finnas i dag.

¹⁸ En medelverkningsgrad på 95 % för en elmotor i en körcykel tycks som en väldigt hög siffra och därför har vi förutsatt ett par procentenheter lägre verkningsgrad. Orsaken till att vi valt en lägre siffra för batteriernas verkningsgrad är att den tenderar att minska något med batteriernas ålder, en faktor som VTT inte tagit hänsyn till. Likväl är 92 % en mycket hög verkningsgrad och den ligger dessutom väsentligt högre än för konventionella batterier av äldre typ, som t.ex. batterier av typen nickelmetallhydrid, eller blybatterier för den delen.

12 DISKUSSION

Det har varit svårt att få in data om priser, drivmedelsförbrukning och annan relevant information från branschens aktörer. Författarna tycker att detta är märkligt och att skattebetalarna borde ha möjlighet till väsentligt mer insyn. Varje svensk bidrar via skattsedeln med ca 2 000 kr till kollektivtrafiken.

På det sätt som kollektivtrafiken är organiserad idag så försvåras insynen. Först så delas den upp länsvis. Varje län sätter upp sina egna mål för verksamheten och handlar sedan upp företag som ska bedriva verksamheten. Dessa företag handlar sedan i sin tur upp de fordon de ska använda för verksamheten. Författarna anser att man skulle kunna spara väsentliga summor pengar och väsentligt öka skattebetalarnas insyn om man gjorde en översyn av den svenska kollektivtrafikens organisation.

Under tidigare decennier, främst på 1990-talet, utfördes mängder av emissionstester på tunga fordon. Testerna utfördes på chassidynamometer. Denna typ av tester har i stort sett upphört. I framtiden kommer ombordmätning av emissioner (PEMS) att utvecklas och kanske kommer då mer data att kunna genereras inom det området. För närvarande är de enda "skarpa" emissionsdata som finns att tillgå certifieringsdata. Tyvärr saknas även här mycket. I datablad från Transportstyrelsen på fordon finns luckor överallt där data saknas. Detta trots att ambitionen finns att sådana data ska vara tillgängliga men inte ens om man betalar för en körning i databaser kan man erhålla en komplett uppsättning med data.

Tidigare brukar fordon som drivs med alternativa drivmedel ge lägre emissioner än konventionella dieseldrivna fordon. I dag tycks situationen vara nästintill omvänd. Endast för NO_x tycks exempelvis gas ge liknande emissionsnivå som för diesel. Alla andra reglerade emissionskomponenter ligger högre. Författarna spekulerar i att gas fortfarande kan vara fördelaktigt ur NO_x synpunkt i tät stadstrafik men direkta bevis för detta saknas för närvarande. Den bästa nyttan av att använda gasbussar borde rimligen därför vara i innerstaden, förutsatt att gasbussar har den förväntade fördelen för NO_x i denna applikation. Det skulle dock sannolikt leda till ökade emissioner av andra emissionskomponenter, där partikelemissionerna ur hälsosynpunkt kanske är den viktigaste komponenten, jämfört med konventionella dieseldrivna bussar. Dessutom tillkommer det faktum att även hybridbussar kommer bäst till sin rätt i tät stadstrafik. Det finns en uppenbar konkurrenssituation mellan båda dessa alternativ.

Intresset för etanoldrivna bussar tycks lågt för tillfället. Inte en enda motor som uppfyller Euro VI erbjuds på marknaden även om en av tillverkarna säkert har kapacitet att introducera en sådan motor ifall den efterfrågas av marknaden. I stället för etanol tycks drivmedel som FAME och HVO ha tagit över marknaden. Drivmedlen kan blandas in i diesel eller köras som "rena" drivmedel. Emissionsmässigt ligger de nära diesel men kan ha vissa för- eller

nackdelar för några reglerade och icke-reglerade emissioner. Det är framförallt *enkelt* att använda FAME och HVO. Ibland har också enkelheten ett pris.

Föreliggande studie har visat att skillnaden mellan olika drivmedel vad gäller emissioner minskat påtagligt jämfört med situationen för bara några år sedan. Emissionskraven sätts av EU och tillverkarna tillhandahåller fordon och motorer som uppfyller kraven (Euro VI för tillfället) med en viss marginal. Strängt taget är skillnaderna mellan fordonen små och andra parametrar borde fälla avgörandet i stället. Detta minskar också fördelarna för rena elbussar och laddhybrider, som kan köras emissionsfritt kortare perioder. Snarare än emissioner borde kriterier för energianvändning, utsläpp av klimatgaser och buller ha större betydelse än emissioner. Detta gäller speciellt på längre sikt eftersom man kan förvänta sig ännu lägre emissioner i framtiden.

Hybridbussar har, som konstaterats på flera ställen i den här rapporten, en hel del fördelar. Den största fördelen är att bränsleförbrukningen är lägre än för konventionella dieseldrivna bussar. Kanske finns möjligheter att också minska emissionerna men något underlag som visar det entydigt har inte hittats. Den största nackdelen med hybrider är för närvarande den höga inköpskostnaden. I sammanställningen av livscykelkostnader ser man att hybridbussen blir dyrare än den konventionella dieselbussen. Kanske kommer detta att ändras på sikt. Skulle hybriden komma ner till samma kostnad som dieselbussen – eller kanske lägre – kommer den med mycket stor sannolikhet att helt ersätta konventionella dieselbussar.

Generellt har resultaten i studien visat att avgasemissionerna från alla alternativen är förhållandevis låga. Det återspeglar sig också i låga samhällsekonomiska kostnader räknat enligt ASEK. Rent tekniskt sett skulle avgaskraven i framtiden kunna sättas ännu något strängare än i Euro VI. Studier i USA har också visat att emissionerna av hälsofarliga och i dag icke reglerade avgaskomponenter minskat på liknande sätt som de reglerade emissionerna. Ofta ligger nivåerna för många hälsofarliga avgaskomponenter kring eller under detektionsgränsen för dagens mätmetoder. Det går inte längre att påvisa att dieselavgaser från moderna motorer till tunga fordon ger cancer hos försöksdjur. Kanske borde fokus därför förskjutas mot att tillse att reningstekniken fungerar väl under fordonets användbara livslängd (hållbarhet), samt i "verklig trafik" (t.ex. via ombordmätning), i stället för att ytterligare skärpa nivåerna i certifieringscykeln.

Ett kvarstående problem med förbränningsmotorer är utsläppen av växthusgaser (främst CO₂). Ökad energieffektivitet minskar dessa utsläpp men även substitution genom biodrivmedel och/eller el från förnybara källor i elfordon och laddhybridfordon är tänkbara lösningar. Rimligtvis borde fokus i framtiden öka på effektivisering och minskade utsläpp av växthusgaser, snarare än att ytterligare minska avgasemissionerna.

Ett annat kvarstående problem är buller, som enligt resultaten i den här studien ger väsentligt högre samhällsekonomiska kostnader än avgasemissioner. Subjektivt kan tyckas att samhället relativt sett inte ställer lika långtgående krav på buller som på avgaser, varken via lag-

krav eller i upphandlingar. Bussar som drivs med enbart el bullrar avsevärt mindre än bussar som drivs med förbränningsmotor men kostar i dag betydligt mer än konventionella bussar. Sannolikt skulle även buller från bussar där förbränningsmotor används kunna minskas men även här är sådana åtgärder förknippade med ökade kostnader. Nämnade kostnader borde vägas mot kostnader för bullersaneringar och andra åtgärder för att minska störningarna från buller.

Resultaten i den här studien visar på lägst kostnad för bussoperatören med konventionella dieselbussar. Allra lägst är kostnaden när de drivs med FAME men här kan de lägre priser på diesel som varit fallet sedan slutet av 2014, samt ändrad beskattning av FAME, påverka kostnadsbilden jämfört med förutsättningarna i studien. Dieselhybridbussar har enligt resultaten i den här studien högre kostnad än konventionella dieselbussar men lägre kostnader än biogas och etanol. Några av intervjupersonerna hävdar lägre kostnader för hybridbussar än för dieselbussar. Klart är att hybridbussarna för närvarande kostar betydligt mer i inköp, vilket måste kompenseras genom lägre bränsleförbrukning. Bränsleförbrukningen borde generellt följas upp bättre för att ge underlag till kostnadsberäkningar, samt även för att kunna prioritera i vilken trafik hybrider kommer bäst till sin rätt. Hybriderna är för tillfället i en tidig fas av introduktion, vilket gör att kostnadsbilden kan förändras framgent.

Någon trovärdig beräkning av kostnadsbilden för eldrivna bussar kan inte göras i dag. De beräkningar som gjorts i denna studie ger en *indikation* på att elbussarna ännu inte är ekonomiskt konkurrenskraftiga jämfört med konventionella bussar. Detta är i ett scenario som förutsätter tämligen stora batterier. Kanske kan andra lösningar, t.ex. snabbbladdning och mindre batterier, ge bättre förutsättningar i framtiden. Någon enighet om vilket alternativ som är det mest fördelaktiga bland elbussarna tycks i alla fall inte finnas i dag.

13 FÖRFATTARNAS TACK

Författarna vill ta tillfället att tacka Kjell Strømmer, Sound Precision Strømmer AB, för värdefullt bidrag till studien avseende bulleremissioner.

Författarna vill också tacka Magnus Lindgren, Peter Smeds och Petter Åsman för underlag och konstruktiva diskussioner om rapportens innehåll.

Studien har finansierats av Trafikverket.

14 REFERENSER

- 1 Ahlvik P., Boding H., Magnusson L. och Ax R.: "Emissionsjämförelse mellan buss och personbil – Effekter på hälsa, miljö och energianvändning." Vägverket publikation 2001:51, 2001.
- 2 Borén S., Nurhadi, L. och Ny, H.: "Hållbarhets- och kostnadsanalys av energibärare för bussar i medelstora svenska städer." Blekinge Tekniska Högskola, 2013-10-09.
- 3 Edwards R. (JRC), Hass H. (EUCAR), Larive J.-F. (CONCAWE), Lonza L. (JRC), Maas H. (EUCAR), Rickeard D. (CONCAWE): "JEC "WELL-to-WHEELS Report, Version 4.a" (huvudrapport; det finns flera underrapporter och bilagor också), Report EUR 26236 EN – 2014, Nedladdningsbar från Internet på: <http://iet.jrc.ec.europa.eu/about-jec/downloads>, nedladdad 2014-11-10.
- 4 Börjesson P., Thufvesson L. och Lantz M.: "Livscykelanalys Av Svenska Biodrivmedel." Rapport 70, Lunds Tekniska Högskola, 2012.
- 5 Börjesson P. and Berglund M.: "Environmental systems analysis of biogas systems—Part I: Fuel-cycle emissions.", Biomass & Energy 30 pp. 469–485, 2006.
- 6 Blinge M., Arnäs P.-O., Bäckström S., Furnander Å., Hovelius K.: "Livscykelanalys (LCA) av drivmedel." KFB-rapport 1997:5, Kommunikationsforskningsberedningen (KFB), Stockholm, 1997.
- 7 Hansson P.-Å., Burström A., Norén O., Bohm M.: "Bestämning av motoremissioner från arbetsmaskiner inom jord- och skogsbruk." Rapport 232, Inst. för Lantbruksteknik, SLU, Uppsala, 1998.
- 8 Ahlvik P., Almén J., Grägg K. och Laveskog A.: "Avgasemissioner med alternativa bränslen." underlagsrapport från Motortestcenter (nuvarande AVL MTC) till Alternativbränsleutredningen, 1996.
- 9 Statens Maskinprovningar (SMP): "Scafi 101 i jämförelse med andra dieselbränslen." Meddelande 3390, 1993.
- 10 Ahlvik P., and Brandberg Å. (Ecotrafic): "Impact on Environment and Health from the Introduction of Low Emission City Buses in Sweden. ", SAE Paper 2000-01-1882, 2000.
- 11 Internet: www.tractordata.com, nedladdad 2015-01-30.
- 12 Vägtrafikregistret VTR administreras av Transportstyrelsen, alla bussar över 5 ton och 8 passagerare, september 2014.
- 13 Personlig kommunikation med Lars Annerberg samt från rapport, Statistik om bussbranschen, augusti 2014 (Sveriges Bussföretag är ett gemensamt förbund för busstrafikföretag)
- 14 Trafikanalys (och SCB), Fordon, 2013
- 15 Ahlvik P, Eriksson L., "Biodrivmedel nu och 2030", Ecotrafic rapport 137063, 2013
- 16 Dieselnet: <https://www.dieselnet.com/news/2014/08mercedes.php>, nedladdad 2015-02-02.
- 17 MECA: "Written comments of the manufacturers of emission controls association on California Air Resources Board's request for public comments on the draft California climate research plan." http://www.meca.org/attachments/2449/Testimony_CA_CC_Research_Plan_0914.pdf , 2014-09-04.
- 18 Nord, K., Haupt, D., Ahlvik, P., and Egeback, K.: "Particulate Emissions From an Ethanol Fueled Heavy-Duty Diesel Engine Equipped With EGR, Catalyst and DPF." SAE Paper 2004-01-1987, 2004.
- 19 Johnson T. (Corning): "Vehicular Emissions in Review." SAE Paper 2014-01-1491, 2014.
- 20 Nylund N.-O. and Koponen K.: "Fuel and technology alternatives for buses – Overall engine efficiency and emission performance." VTT Technology 46, 2012.
- 21 Theissl H., Danninger A., Sacher T., Ofner H. and Schalk E.: "A Study on Operation Fluid Consumption for Heavy Duty Diesel Engine Application using both, EGR and SCR." SAE Paper 2013-01-2474, 2013.

-
- 22 Graham M. S., Crossley S., Harcombe T., Keeler N., and Williams T.: "Beyond Euro VI - Development of A Next Generation Fuel Injector for Commercial Vehicles." SAE Paper 2014-01-1435, 2014.
 - 23 Ahlvik P. "Well to wheel efficiency for heavy-duty vehicles - *Comparison of various biofuels in a long distance lorry and a city bus.*" Trafikverket, tillgänglig på www.ecotraffic.se, 2008.
 - 24 Heuser P., Geiger J., Lauer S., Sankhla H., Dhongde A., and Simm P.: "Diesel-Based Natural Gas Engines for Commercial Applications." 35. Internationales Wiener Motorensymposium 2014, 2014.
 - 25 Benz M., Hoffmann K., Weirich M., and Herrmann H.-O. (Daimler AG): "The New Euro VI Natural Gas Engine for Mercedes-Benz Medium Duty Commercial Vehicles." 35. Internationales Wiener Motorensymposium 2014, 2014.
 - 26 Achenbach T., von Eisebeck G., Nickels T., and Wiebicke U.: "Benefits and requirements of the hybridization of Euro VI diesel engines in commercial vehicles." 35. Internationales Wiener Motorensymposium 2014, 2014.
 - 27 Internet: Green Car Congress, <http://www.greencarcongress.com/2014/02/20140227-flybrid.html>, nedladdat 2015-02-02.
 - 28 Internet: <http://www.greencarcongress.com/2014/09/201409112-kers.html>
 - 29 Flywheel Hybrid, Wrightbus, <http://www.wrightsgroup.com/datasheets/Flybrid%20leaflet4.pdf>, 2014.
 - 30 Internet: <http://www.greencarcongress.com/2013/01/psabosch-20130122.html>, nedladdat 2015-02-02.
 - 31 Internet: <http://www.epa.gov/otaq/technology/research/research-hhvs.htm>, nedladdat 2015-02-02.
 - 32 Internet: <http://www.altairpd.com/CaseStudyDetail.aspx?id=37&AspxAutoDetectCookieSupport=1>, nedladdat 2015-02-02.
 - 33 Altair: "Developing the World's First Series Hydraulic Hybrid Bus through Simulation Driven Design." Tillgänglig via Internet: <http://resources.altair.com/pdd/images/en-US/CaseStudy/BUSolutions-Developing-the-Worlds-First-Series-Hydraulic-Hybrid-Bus.pdf>, 2014.
 - 34 Internet: http://www.idsc.ethz.ch/Research_Guzzella/Automotive_Applications/Hybrid_Pneumatic_Powertrain, nedladdat 2015-02-02.
 - 35 Internet: www.preem.se
 - 36 Internet: www.sekab.se
 - 37 Internet: www.agroetanol.se
 - 38 Internet: www.energigas.se
 - 39 Internet: www.energimyndigheten.se
 - 40 MJB & A: "Comparison of Modern CNG, Diesel and Diesel Hybrid-Electric Transit Buses: Efficiency & Environmental Performance." M.J. Bradley & Associates LLC, <http://www.mjbradley.com>, 2013.
 - 41 Khalek I. A., Bougher T. L., Merritt P. M.: "Phase 1 of the Advanced Collaborative Emissions Study." Coordinating Research Council (CRC) Report, 2009. Tillgänglig på Internet: www.crao.org/publications/emissions/index.html, nedladdad i oktober 2014.
 - 42 HEI: "Advanced Collaborative Emissions Study (ACES): Lifetime Cancer and Non-Cancer Assessment in Rats Exposed to New-Technology Diesel Exhaust." HEI Report 184, 2015.
 - 43 UITP project "SORT" – standardised on-road test cycles – 2014 edition, D/2014/0105/1, UITP 2014.
 - 44 Volvo visar nya laddhybridbussen, Ny Teknik, 1 september 2014.
-

-
- 45 Världspremiär för Volvos nya laddhybridbussen, Ny Teknik, 1 september 2014.
 - 46 Hållbara biodrivmedel och flytande biobränslen under 2013, Statens Energimyndighet, 2014
 - 47 FN/ECE: Föreskrifter nr 51 från Förenta nationernas ekonomiska kommission för Europa (FN/ECE) –Enhetliga bestämmelser om typgodkännande av motorfordon med minst fyra hjul med avseende på deras buller. EU Lex L 137/68, Tillgänglig via Internet: [http://eur-lex.europa.eu/legal-content/SV/TXT/PDF/?uri=CELEX:42007X0530\(02\)](http://eur-lex.europa.eu/legal-content/SV/TXT/PDF/?uri=CELEX:42007X0530(02)), 2007
 - 48 F. d. Roo och P. j. v. Beek, "New EU Redulation on the sound level of motor vehicles," TNO, Hague, 2014.
 - 49 F. d. Roo, M.G.Dittrich, P. v. Beek, C.Bosschaart, G.B.Derksen och M. Kievit, "VENOLIVA," TNO, Delft, 2011.
 - 50 F. d. Roo, M. Dittrich, C. Bosschaart och B. Berry, "Rediction of vehicle noise emission - Technological potential and impacts," TNO, The Hague, 2012.
 - 51 H. Ljungblad och T. Renhammar, "Tystare stadsbussar, kravställning vid upphandling för minskat källbuller," Koucky & Partners, Göteborg, 2013.
 - 52 Trafikverket, ASEK 5.1. Nedladdningsbart på Internet via: http://www.trafikverket.se/PageFiles/155458/10_buller_a51.pdf, nedladdat 2015-03.
 - 53 Arbetsmiljöverket, "Arbetsmiljöverkets författningssamling AFS 2005:16, Buller," Arbetsmiljöverket, Solna, 2005.
 - 54 M. E. Nilsson och B. Berglund, "Upplevd ljudmiljö i stadsnära grönområden och stadsparker," Naturvårdsverket, rapport 5442, Stockholm, 2005.
 - 55 Jonasson, "Jämförelse mellan Nord2000 Road och 1996- års modell, SP rapport 2009:18," SP, Sveriges Tekniska Forskningsinstitut, Borås, 2009.
 - 56 Transportstyrelsen: Lina Andersson, Linda Dahlgren, Stina Eklund, "Elbilar och buller. Förstudie om olyckor med tystgående elbilar," Transportstyrelsen, Borlänge, 2013.
 - 57 I. Milford, S. Aaseboe och K. Strommer, "Value for Money in Road Traffic Noise Abatement," i Internoise 2014, Melbourne Australia, 2014.
 - 58 I. Milford, S. Aasebo, K. Strömmer and K. Gspan, "Value for Money in Road Traffic Noise Abatement," CEDR, HAAG, 2013.
 - 59 EC: Proposal for a REGULATION OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL on the approximation of the laws of the Member States with respect to emissions from on-road heavy duty vehicles and on access to vehicle repair information." COM(2007) 851 final, SEC(2007) 1718, 2007-12-21.
 - 60 Pihlatie M., Kukkonen S., Halmeaho T., Karvonen V., and Nylund N.-O. (VTT): "Fully Electric City Buses – The Viable Option.", IEEE International Electric Vehicle Conference, IEVC 2014, 17 - 19 December 2014, Florence, Italy, 2014.
-