

Vergelijking van kosten en milieu- aspecten van EEV-bussen op diesel en CNG

Op basis van de
MAN Lion's City stadsbus

Rapport

Delft, december 2007

Opgesteld door: R.T.M. (Richard) Smokers
M.B.J. (Matthijs) Otten



Colofon

Bibliotheekgegevens rapport:

R.T.M. (Richard) Smokers, M.B.J. (Matthijs) Otten
Vergelijking van kosten en milieu-aspecten van EEV-bussen op diesel en CNG
Op basis van de MAN Lion's City stadsbus
Delft, CE Delft, 2007

Kosten / Emissies / Vergelijkend onderzoek / Autobussen / Motoren /
Milieuvriendelijk / Brandstoffen / Duurzaamheid / Aardgas / Dieselolie

VT: Biodiesel / Biogas

Publicatienummer: 07/4.589.50

Alle CE Delft-publicaties zijn verkrijgbaar via www.ce.nl

Opdrachtgever: MAN Truck & Bus BV

Meer informatie over de studie is te verkrijgen bij de projectleider R.T.M. (Richard) Smokers.

© copyright, CE, Delft

CE Delft

Oplossingen voor milieu, economie en technologie

CE Delft is een onafhankelijk onderzoeks- en adviesbureau, gespecialiseerd in het ontwikkelen van structurele en innovatieve oplossingen van milieuvraagstukken. Kenmerken van CE-oplossingen zijn: beleidsmatig haalbaar, technisch onderbouwd, economisch verstandig maar ook maatschappelijk rechtvaardig.

Dit rapport is gedrukt op 100% kringlooppapier

Inhoud

Samenvatting	1
1 Inleiding	5
1.1 Context	5
1.2 Afbakening	6
1.3 Methodologie	8
1.3.1 Emissies	8
1.3.2 Milieukosten	9
1.3.3 Kosten	9
1.4 Leeswijzer	9
2 Resultaten: emissies	11
2.1 Inleiding	11
2.2 Energiegebruik aan de krukas	12
2.3 Brandstofverbruik en directe emissies	12
2.4 Well-to-Wheel broeikasgasemissies	15
2.5 Externe kosten	16
3 Resultaten: kosten	19
3.1 Algemene aannames	19
3.2 Aanschaf en afschrijving bussen	19
3.3 Onderhoudskosten	20
3.4 Brandstofkosten	21
3.4.1 Relatie tussen aardgasprijs en dieselprijs	22
3.4.2 Kosten van een aardgasvulstation	22
3.4.3 Kosten van dieselpomp	23
3.4.4 Resulterende brandstofprijzen	24
3.4.5 Vergelijking van brandstofkosten	25
3.5 Resultaten kostenvergelijking	26
3.6 Gevoeligheidsanalyse m.b.t. kostenvergelijking	27
3.6.1 Restwaarde	27
3.6.2 Diesel- en aardgasprijs	28
3.6.3 Afschrijvingsperiode voor CNG-vulstation	30
3.6.4 Vlootomvang per vulstation	30
3.6.5 Jaarkilometrage	31
4 Vergelijking van 'total cost of ownership' en milieukosten	33
5 Conclusies	35
Literatuur	39

Samenvatting

CE Delft heeft in opdracht van MAN Bus & Truck BV een vergelijking gemaakt van de kosten en emissies van door MAN geproduceerde stadsbussen op diesel en aardgas die voldoen aan de EEV-emissienorm. De EEV-dieselbus van MAN maakt gebruik van EGR en een gesloten CRT-roetfilter. De EEV-aardgasbus van MAN heeft een stoichiometrische motor ($\lambda = 1$) en een drieweg-katalysator. In de vergelijking is ook het gebruik van biodiesel en biogas meegenomen. Beide bussen zijn gebaseerd op hetzelfde voertuigplatform (MAN Lion's City), zodat de verschillen in kosten en milieueffecten geheel zijn toe te schrijven aan de gebruikte brandstoffen.

De algemene uitgangspunten voor de vergelijking zijn weergegeven in Tabel 1. Voor de vergelijking is deels gebruikt gemaakt van informatie uit de openbare literatuur, maar voor een belangrijk deel ook van informatie die is aangeleverd door MAN Truck & Bus BV en andere betrokken partijen. Deze informatie is kritisch geëvalueerd aan de hand van eerder door CE Delft uitgevoerde studies op dit gebied en is op een consistente wijze in de vergelijking verwerkt. De resultaten van de vergelijking zijn samengevat in Tabel 2.

Tabel 1 Algemene uitgangspunten voor de vergelijking van MAN EEV-stadsbussen op diesel, biodiesel, aardgas en biogas

Brandstof		Diesel	Biodiesel B100	Aardgas	Biogas
Technologie		EGR+CRT	EGR+CRT	$\lambda = 1$	$\lambda = 1$
Model		MAN	MAN	MAN	MAN
Motortype		D0836LOH63	D0836LOH63	E2866DUH03/04	E2866DUH03/04
Aanschafkosten bus	€/voertuig	200.000	200.000	240.000	240.000
Restwaarde	€/voertuig	41.400	41.400	49.680	49.680
Leeggewicht	kg	11.000	11.000	12.200	12.200
Concessieperiode	jaar	8	8	8	8
Jaarkilometrage	km	65.000	65.000	65.000	65.000
Aanschafkosten aardgasvulstation*	€/unit			900.000	900.000
Restwaarde aardgasvulstation	€/voertuig			0	0
Brandstofprijs Diesel/biodiesel**	€/liter	0,83	0,98		
Inkoopprijs aardgas/biogas	€/m ³			0,28	0,34
Brandstofprijs***	€/m ³			0,45	0,59

*) Capaciteit 20 tot 40 bussen.

**) Nettoprijs voor vervoerder (excl. BTW, incl. kortingen).

***) Nettokosten voor vervoerder (excl. BTW, incl. energibelasting, incl. kosten vulstation).

Wat betreft emissies van relevante luchtverontreinigende stoffen hebben MAN EEV-bussen op aardgas een voordeel t.o.v. MAN EEV-bussen op diesel door hun zeer lage NO_x- en NO₂-emissies. De MAN EEV-bussen op diesel zijn de helft schoner dan de gasbussen wat betreft PM₁₀-emissies. De emissies van PM₁₀ zijn voor beide brandstoffen echter zeer laag. De Well-to-Wheel (WTW) broeikasgasemissies van bussen op aardgas zijn vergelijkbaar met die van dieselbussen op basis van ketenemissies voor de gemiddelde EU-mix van bronnen van het gebruikte aardgas. De WTW- broeikasgasemissies van aardgasbussen stijgen wanneer aardgas wordt gebruikt dat is geïmporteerd over grote transportafstanden.

De impact van gebruik van 100% biodiesel op de WTW-broeikasgasemissies van dieselbussen is beperkt tot zo'n 30 à 40% reductie. Gebruik van 100% biogas in de gasbussen leidt tot een reductie van de WTW-broeikasgasemissies t.o.v. aardgas van 75% (voor biogas uit afval) tot 200% (voor biogas uit natte mest). De WTW-broeikasgasemissies van biogas uit natte mest zijn negatief doordat deze optie niet alleen gebruik maakt van CO₂-neutrale biomassa maar tevens leidt tot een grote afname van de methaanemissies uit de mestopslag en bij uitrijden van mest over het land.

Op basis van de in deze vergelijking gehanteerde uitgangspunten, inputgegevens en aannames zijn de 'total cost of ownership' (som van kapitaal- en operationele kosten) van MAN EEV-stadsbussen op aardgas 1,5 Eurocent per kilometer hoger dan die van MAN EEV-stadsbussen op diesel. Verschillende aannames m.b.t. kosten en specifieke gebruiksomstandigheden hebben een significante invloed op de uitkomsten van de vergelijking:

- Voor de restwaarde van beide bussen is een door MAN gegarandeerde terugkoopwaarde voor beide bussen gehanteerd. M.n. de restwaarde van CNG-bussen kan daar op de vrije markt sterk van afwijken. Een € 10.000,- lagere restwaarde voor de aardgasbus leidt tot een verhoging van de 'total cost of ownership' met 2 Eurocent per kilometer.
- De diesel- en aardgasprijs zijn aan elkaar gekoppeld. Deze koppeling is echter zodanig dat een verhoging van de retailprijs van diesel (incl. BTW) met 0,10 €/liter leidt tot een verlaging van het verschil in 'total cost of ownership' van aardgas- en dieselbussen met 1,3 Eurocent per kilometer.
- Wanneer de gas- en dieselprijs onafhankelijk van elkaar gevarieerd worden leidt een verlaging/verhoging van de gasprijs met 0,05 €/m³ tot een verlaging/verhoging van het verschil in 'total cost of ownership' van aardgas- en dieselbussen met zo'n 3,5 Eurocent per kilometer.
- Voor de benutting van het aardgasvulstation is uitgegaan van een vloot van 30 bussen en een vulstation met een capaciteit die toereikend is om 's avonds en 's nachts 20 tot 40 bussen te vullen. Verhoging van de benutting tot 40 bussen per vulstation leidt tot een verlaging van het verschil in 'total cost of ownership' van aardgas- en dieselbussen met zo'n 2 Eurocent per kilometer.



- Voor de stadsbussen is een jaarkilometrage van 65.000 km aangenomen. Dit jaarkilometrage beïnvloedt de uitkomst via de restwaarde en de resulterende afschrijving van de bussen en via de kosten per m³ van het aardgas-vulstation. Bij een jaarkilometrage van 72.000 km zijn de kosten (kapitaal-plus operationele kosten) van beide bussen aan elkaar gelijk. Bij 55.000 km neemt het verschil toe tot bijna 4,5 Eurocent per kilometer.
- Voor de onderhoudskosten is uitgegaan van kosten waarvoor MAN het onderhoud van beide bustypen aanbiedt op basis van een jaarkilometrage van 65.000 km en een contractduur van acht jaar. Deze kosten kunnen anders uitvallen wanneer het onderhoud in eigen beheer of door een ander onderhoudsbedrijf wordt uitgevoerd.

Tabel 2 Resultaten van de vergelijking van MAN EEV-stadsbussen op diesel, biodiesel, aardgas en biogas m.b.t. 'total cost of ownership' en externe milieukosten

Brandstof	Diesel	Biodiesel B100	Aardgas EU-mix	Aardgas 4000 km	Biogas Afval	Biogas Natte mest	
Technologie	EGR+CRT	EGR+CRT	$\lambda = 1$	$\lambda = 1$	$\lambda = 1$	$\lambda = 1$	
Model	MAN	MAN	MAN	MAN	MAN	MAN	
Motor type	D0836LOH63	D0836LOH63	E2866DUH03/04	E2866DUH03/04	E2866DUH03/04	E2866DUH03/04	
<i>Kapitaal- + operationele kosten</i>							
Rente en afschrijving	€/km	0,37	0,37	0,44	0,44	0,44	0,44
Onderhoud	€/km	0,16	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17
Brandstofkosten	€/km	0,38	0,49	0,31	0,31	0,40	0,40
<i>Total cost of ownership</i>	€/km	0,90	1,02	0,91	0,91	1,01	1,01
<i>Totaal externe kosten</i>	€/km	0,06	0,04	0,04	0,04	0,02	-0,03
Totale kosten	€/km	0,95	1,06	0,95	0,96	1,02	0,97

De NO_x-, PM₁₀- en CO₂-emissies van beide bussen kunnen m.b.v. schadekosten worden omgerekend naar zogenaamde externe milieukosten. Monetarisering van milieu-impacts is een nuttig instrument bij het afwegen van de kosten en baten van verschillende vermijdingsopties en helpt bij het definiëren van kosteneffectief beleid, in dit geval toe te passen op verbetering van lokale luchtkwaliteit door het opnemen van milieu-eisen in OV-concessies of het kiezen van specifieke aandrijftechnologie voor bussen. De externe kosten van EEV-bussen op aardgas zijn zo'n 1,5 Eurocent per kilometer lager dan van EEV-bussen op diesel, m.n. als gevolg van de lagere NO_x-emissies van de MAN EEV-aardgasbussen t.o.v. de MAN EEV-bussen op diesel. Rekening houdend met dit verschil in externe milieukosten daalt het verschil in totale kosten ('total cost of ownership' + externe milieukosten) tot nagenoeg nul. De 'total cost of ownership' van MAN EEV-bussen op 100% biogas zijn nagenoeg gelijk aan die van MAN EEV-bussen op 100% biodiesel. Door de veel hogere Well-to-Wheel broeikasgasreductie van

biogas t.o.v. biodiesel zijn de externe kosten bij rijden op biogas veel lager dan bij rijden op biodiesel. Gebruik van biogas uit natte mest leidt door de zeer hoge reductie van broeikasgasemissies tot totale kosten ('total cost of ownership' + externe milieukosten) die slechts 2 Eurocent per km hoger zijn dan voor rijden op diesel en zo'n 10 Eurocent per km lager dan voor rijden op 100% biodiesel.

Uit de analyse is duidelijk dat de precieze verhouding van de 'total cost of ownership' van MAN EEV-stadbussen op diesel en aardgas sterk afhangt van de specifieke gebruiksomstandigheden en van de werkelijke brandstofkosten. Deze conclusie is ook geldig voor de vergelijking van/met bussen van andere merken. Belangrijke elementen die de kostenvergelijking beïnvloeden zijn de restwaarde van de bussen en de onderhoudskosten. Benadrukt dient te worden dat de hier gepresenteerde vergelijking voor beide kostenelementen gebruik maakt van door MAN Truck & Bus opgegeven waarden. De restwaarde voor beide bussen betreft een gegarandeerde terugkoopwaarde. De onderhoudskosten zijn de kosten waarvoor MAN Truck & Bus een onderhoudscontract aanbieden op basis van de hier gebruikte waarden voor concessieduur en jaarkilometrage van de bussen.

Algemeen kan geconcludeerd worden dat voor de door MAN geproduceerde EEV-stadsbussen op diesel en aardgas de totale kapitaal- en operationele kosten dicht bij elkaar liggen, en dat de aardgasbussen een significant milieuvoordeel bieden, met name wat betreft de NO_x-emissies. Gebruik van 100% biodiesel resp. biogas in deze bussen leidt tot vergelijkbare kosten per kilometer ('total cost of ownership'), maar levert voor biogas veel hogere WTW-broeikasgasreducties dan voor biodiesel. Deze hogere WTW broeikasgasreducties vertalen zich in significant lagere externe milieukosten voor biogas in vergelijking met biodiesel.



1 Inleiding

1.1 Context

De belangstelling voor aardgas als voertuigbrandstof neemt de laatste tijd toe. Drijfveren daarbij zijn voordelen m.b.t. lokale luchtkwaliteit en mogelijke bijdragen aan vermindering van broeikasgasemissies, met name als biogas wordt ingezet. Met name gemeenten en provincies hebben interesse, enerzijds voor toepassing in hun eigen vloot en anderzijds in het kader van de aanbesteding van concessies voor stedelijk en regionaal openbaar vervoer (bussen).

OV-aanbesteders hebben de mogelijkheid om eisen te stellen aan de bussen waarmee de OV-diensten worden uitgevoerd. Eisen kunnen worden gesteld in termen van techniekneutrale emissienormen, bijv. door voor alle in te zetten bussen minimaal Euro-3 of Euro-4 te eisen, of zelfs door voor een deel of de gehele vloot te eisen dat voertuigen voldoen aan Euro-5 of de voor PM₁₀ nog iets scherpere EEV-norm (zie Tabel 3). Verschillende gemeenten (bijv. Haarlem) en regionale OV-aanbesteders (bijv. Haaglanden) hebben echter op dit moment een sterke voorkeur voor aardgas boven diesel, zelfs als deze laatste voldoen aan Euro-5 of de EEV-eisen.

Tabel 3 Emissielimieten voor motoren van zware voertuigen, uitgedrukt in gram emissie per kWh aan de krukas geleverde energie, op basis van de ETC-test (transiënte belastingscyclus)

	Jaar	CO [g/kWh]	NMHC [g/kWh]	CH ₄ [g/kWh]	NO _x [g/kWh]	PM [g/kWh]
Euro-3	2000	5,45	0,78	1,6	5,0	0,16
Euro-4	2005	4,00	0,55	1,1	3,5	0,03
Euro-5	2008	4,00	0,55	1,1	2,0	0,03
EEV	1999	3,00	0,40	0,65	2,0	0,02

Het blijkt in de praktijk voor beleidsmakers bij de verschillende aanbestedende partijen en voor inkopers bij de OV-bedrijven moeilijk om op basis van de door fabrikanten aangeleverde informatie over diesel- en aardgasbussen een objectief oordeel te vellen over de voor- en nadelen van beide technieken. Daarbij gaat het enerzijds over de milieuaspecten en anderzijds over de kosten. Het aanbod aan producten van verschillende fabrikanten is moeilijk onderling vergelijkbaar en cijfers worden niet altijd op een heldere en objectieve wijze gepresenteerd.

MAN Truck & Bus BV heeft CE Delft gevraagd om een objectieve vergelijking op te stellen van milieueffecten en kosten van de door haar geleverde MAN Lion City EEV-bussen op aardgas en diesel. CE Delft beoogt met dit rapport een consistente vergelijking te maken. Daarbij dient opgemerkt dat de uitkomsten nog steeds deels afhankelijk zijn van inputcijfers waarvoor verschillende bronnen zeer uiteenlopende cijfers geven of waarvoor bij gebrek aan harde data aannames moeten worden gemaakt. Los van deze onzekerheden zal de vergelijking ook verschillend uitpakken voor verschillende toepassingen (bijv. verschillende

steden waarin de bussen worden toegepast) omdat bijvoorbeeld werkelijk brandstofverbruik, concessieduur en jaarkilometrage de vergelijking sterk beïnvloeden. De invloed van variaties van de inputgegevens wordt inzichtelijk gemaakt middels gevoeligheidsanalyses.

1.2 Afbakening

In dit rapport wordt een vergelijking uitgewerkt van de kosten en milieu-impacts van twee specifieke door MAN geproduceerde modellen bussen. De bussen hebben hetzelfde voertuigplatform (MAN Lion's City) en voldoen aan dezelfde emissienorm (EEV) maar hebben een verschillende motor en rijden op verschillende brandstoffen. Specificaties van beide bussen zijn weergegeven in Tabel 4. Deze bussen worden vergeleken voor de toepassing als stadsbus, door uit te gaan van een voor stadsbussen representatief ritpatroon en jaarkilometrage.

Tabel 4 Voertuigen van MAN waarvoor de vergelijking is uitgevoerd

Model	Motor	Inhoud [cm ³]	Brandstof	Emissie-klasse	Techniek
Lion's City	D0836LOH63	6.871	diesel	EEV	EGR* & CRT**
Lion's City	D0836LOH63	6.871	biodiesel	EEV	EGR* & CRT**
Lion's City	E2866DUH03/04	11.967	aardgas	EEV	$\lambda = 1$ & driewegkatalysator
Lion's City	E2866DUH03/04	11.967	biogas	EEV	$\lambda = 1$ & driewegkatalysator

*) EGR = Exhaust Gas Recirculation.

**) CRT = Continuously Regenerating Trap.

De EEV-dieselmotoren van MAN maken gebruik van uitlaatgasrecirculatie (Exhaust Gas Recirculation of EGR) voor vermindering van de NO_x-emissies en een gesloten CRT-filter (Continuously Regenerating Trap) voor reductie van de emissies van fijn stof. EEV-dieselmotoren van een aantal andere fabrikanten maken gebruik van SCR-deNO_x (Selective Catalytic Reduction) met ureum (AdBlue) voor NO_x-reductie en meestal een halfopen roetfilter voor reductie van PM₁₀-emissies. Deze technieken zullen in de regel leiden tot andere emissiecijfers voor NO_x, NO₂ en PM₁₀ dan de getallen die in dit rapport voor de MAN-bussen worden gepresenteerd.

De EEV-aardgasbussen van MAN hebben een stoichiometrische motor ($\lambda = 1$) en een driewegkatalysator voor uitlaatgasnabehandeling. De bussen zijn uitgerust met acht aardgastanks met een druk van 200 bar en een inhoud van 1.700 liter totaal. Hiermee hebben de bussen een actieradius van 400 tot 500 km op een volle tank.

Er zijn in de afgelopen jaren en ook recent verschillende algemene vergelijkingen gemaakt van diesel- en aardgasbussen (o.a. CE Delft, (2005a), CE Delft, (2007), Duinn, (2007)). In dit geval is gekozen voor een specifieke vergelijking van twee concrete modellen.



De redenen om de vergelijking op deze wijze uit te voeren zijn de volgende:

- Bij gelijke gebruiksomstandigheden worden verschillen in kosten, brandstofverbruik en emissies tussen twee bussen van verschillende merken en modellen enerzijds bepaald door de gebruikte motortechniek en brandstof en anderzijds door het voertuigplatform (bijv. voertuiggewicht). Door de vergelijking uit te voeren voor bussen die op hetzelfde platform zijn gebaseerd wordt een eenduidige vergelijking van diesel t.o.v. aardgas mogelijk in relatie tot de gebruikte motortechniek. De invloed van eventuele verschillen in voertuiggewicht, bijvoorbeeld als gevolg van toepassing van lichtgewicht materialen, wordt buiten beschouwing gelaten. In de vergelijking van twee verschillende bussen hebben gewicht en ook lucht- en rolweerstand vanzelfsprekend wel een effect op kosten en milieu-impacts, maar we willen deze effecten loskoppelen van de keus voor diesel of aardgas.
- Een algemene vergelijking van voertuigen op diesel en aardgas m.b.t. emissies is in het geval van bussen maar ten dele zinvol. Emissies van voertuigen op beide brandstoffen verschillen sterk van model tot model. Verschillen bij diesel hangen sterk af van de methode van uitlaatgasnabehandeling (SCR-deNO_x vs. EGR met roefilter). Bij aardgas worden de verschillen in belangrijke mate bepaald door het verbrandingsprincipe en de bijbehorende uitlaatgasnabehandeling (lean burn vs. stoichiometrisch ($\lambda = 1$) met driewegkatalysator). Voor beide motortypen hangen de emissies, niet alleen op de typekeuringstest maar juist ook in de praktijk, sterk af van de door de fabrikant gekozen motorkalibratie. In principe is het mogelijk uitspraken te doen op basis van gemiddelde emissiefactoren voor beide brandstoffen (bijv. gemiddeld voor Nederland). Maar omdat in het geval van een OV-concessie de vloot in de regel zeer homogeen is (veel voertuigen van hetzelfde type) is de gemiddelde emissiefactor niet noodzakelijk representatief voor de uiteindelijk aangeschafte bussen. Bovendien geldt dat de voor Nederland beschikbare emissiefactoren voor aardgasbussen niet op dezelfde betrouwbare statistische basis¹ zijn afgeleid als die voor dieselbussen.

Voor de dieselbus wordt tevens gekeken naar de impact op kosten en milieueffecten van het rijden op biodiesel. Voor de aardgasbus wordt ook rijden op biogas in de vergelijking meegenomen.

Als rekenvoorbeeld voor biodiesel wordt steeds rijden op 100% biodiesel (B100) gebruikt. Op deze manier worden de verschillen in kosten en impacts beter zichtbaar. De effecten van rijden op brandstof met een bepaald percentage bijgemengde biodiesel kunnen worden berekend door gewogen middeling van de resultaten voor conventionele diesel en 100% biodiesel met de aandelen in de brandstof.

¹ Voor informatie over emissiefactoren voor wegverkeer in Nederland zie: 'Methoden voor berekening van de emissies van mobiele bronnen in Nederland', CBS, MNP, RIZA, TNO en AVV, oktober 2007.
<http://www.cbs.nl/nl-NL/menu/themes/natuur-milieu/methoden/dataverzameling/overige-dataverzameling/2006-methoden-emissies-mobiele-bronnen-nederland-pub.htm>.

Rijden op 100% biodiesel is met de in dit rapport beschouwde EEV-dieselbussen technisch wel mogelijk maar wordt door de fabrikant ontraden. Gebruik van hoge percentages biodiesel leidt o.a. tot een benodigde vier tot vijf keer hogere frequentie voor olieversen, als gevolg van de optreden smeerolieverdunding.

N.B. Onder biodiesel wordt in dit rapport in alle gevallen veresterde plantenolie verstaan (bijv. uit koolzaad: rapeseed methylester of RME). Pure plantenolie of PPO is geen biodiesel en kan niet worden toegepast in de EEV-dieselbussen.

1.3 Methodologie

Hieronder wordt in grote lijnen de gebruikte methodologie toegelicht. Het betreft hier een modelmatige simulatie van praktijkemissies op basis van typekeuringsgegevens gemeten over een transiënte cyclus (ETC). Voor de aanpak is gekozen om op basis van beschikbare gegevens tot een zo consistent mogelijke vergelijking van de verschillende bustypen te komen. Met name voor brandstofverbruik en CO₂-emissies is deze methode zeer betrouwbaar. Details van de methodologie en de gebruikte aannamen worden in de volgende hoofdstukken besproken in relatie tot de gepresenteerde resultaten.

1.3.1 Emissies

Voertuigemissies van beide bussen zijn bepaald op basis van emissiegegevens uit de typekeuring (gemeten op ETC-cyclus) en waarden voor het energiegebruik die berekend zijn met een voertuigsimulatiemodel op basis van een voor stad-bussen representatieve ritcyclus (DUBC). Voor de meest relevante lokale uitlaatgascomponenten, zijnde NO_x en PM₁₀, zijn emissies in g/km berekend door ETC-data in g/kWh te vermenigvuldigen met het energiegebruik aan de krukas in kWh/km zoals berekend in de voertuigsimulatie. De emissies betreffen dus voor praktijkgebruik geschatte waarden.

Op vergelijkbare wijze is het brandstofverbruik bepaald, gebruik makend van door MAN aan geleverde resultaten van verbruiksmetingen over de ETC-cyclus en het berekende energiegebruik aan de krukas. CO₂-emissies uit de uitlaat zijn berekend door het verbruik te vermenigvuldigen met de 'CO₂-inhoud' van de brandstoffen.

Voor broeikasgasemissies is niet alleen gekeken naar emissies uit de uitlaat (zgn. 'Tank-to-Wheel'-emissies, TTW) maar ook naar de emissies in de energieketen (zgn. 'Well-to-Tank'-emissies, WTT). De combinatie van beiden levert de 'Well-to-Wheel'-emissies (WTW) op. WTT-emissies voor diesel en aardgas zijn overgenomen uit Concawe, (2007). WTW-broeikasgasemissies worden uitgedrukt in g CO₂-equivalenten, waarbij behalve CO₂ ook emissies van de broeikasgassen methaan (CH₄) en lachgas (N₂O) zijn meewogen op basis van hun respectievelijke GWP². Voor aardgasbussen zijn hier ook de directe methaanemissies uit de uitlaat in meegenomen zoals bepaald op de ETC-test.

² Greenhouse Warming Potential: GWP van CH₄ = 23, GWP van N₂O = 296.



1.3.2 Milieukosten

Emissies van luchtverontreinigende stoffen leiden tot slechte luchtkwaliteit in termen van hoge lokale concentraties van bijvoorbeeld NO₂ en PM₁₀. Verschillende uitlaatgassen dragen ook bij aan de vorming van ozon. Blootstelling aan te hoge concentraties van deze stoffen leidt tot gezondheidsschade bij mensen. Verzurende stoffen in de uitlaatgassen van voertuigen leiden bovendien tot schade aan natuur en gebouwen. Deze schadekosten kunnen worden gekwantificeerd en uitgedrukt in Euro per kilogram of ton emissie.

Door de voor beide voertuigen berekende emissies te vermenigvuldigen met de schadekosten per eenheid emissie en de schadekosten voor de verschillende componenten op te tellen kunnen de totale milieukosten per voertuigkilometer worden bepaald. Monetarisering van milieu-impacts is een nuttig instrument bij het afwegen van de kosten en baten van verschillende vermijdingsopties en helpt bij het definiëren van kosteneffectief beleid, in dit geval toe te passen op verbetering van lokale luchtkwaliteit door inzet van schone bussen.

Voor de kwantificatie van schadekosten is voor dit rapport gebruik gemaakt van resultaten van een recent door CE Delft en andere partijen in opdracht van de Europese Commissie uitgevoerd onderzoek (IMPACT, 2007). In de hier gepresenteerde vergelijking worden bij de bepaling van milieukosten alleen NO_x, PM₁₀ en broeikasgassen meegenomen.

1.3.3 Kosten

Voor beide bussen worden de 'total cost of ownership' vergeleken, d.w.z. de som van kapitaalkosten en operationele kosten. Bij dat laatste zijn de chauffeurskosten buiten beschouwing gelaten omdat die voor beide bussen gelijk zijn. In de kostenvergelijking zijn de volgende posten meegenomen:

- aanschafkosten van de bussen;
- restwaarde van de bussen;
- onderhoudskosten van de bussen;
- inkoopkosten van de gebruikte brandstoffen;
- kosten van dieseltankstation op terrein van vervoerder;
- in geval van aardgas;
 - kapitaalkosten van het gebruikte aardgasvulstation op terrein van vervoerder;
 - operationele kosten van het aardgasvulstation op terrein van vervoerder.

Kapitaalkosten zijn omgerekend naar jaarlijkse kosten (annuïteit) op basis van het verschil van aanschafkosten en restwaarde, de levensduur en een disconto-voet.

1.4 Leeswijzer

Alle in dit rapport gepresenteerde data en conclusies hebben betrekking op de vergelijking van door MAN geproduceerde EEV-bussen op diesel en aardgas. Daar waar voor het gemak en voor behoud van de leesbaarheid wordt gesproken over 'diesalbussen' of 'aardgasbussen' dient dus steeds gelezen te worden 'MAN

EEV-dieselbussen' resp. 'MAN EEV-aardgasbussen' van de typen zoals beschreven in Tabel 4.



2 Resultaten: emissies

2.1 Inleiding

Praktijkgegevens m.b.t. het brandstofverbruik van bussen zijn in de regel slecht vergelijkbaar omdat de bussen die vergeleken worden nooit op precies dezelfde wijze worden gebruikt. Verschillen in toepassing betreffen ondermeer de gereden routes, bijbehorende halteafstanden en snelheidsprofielen, verdelingen van gereden kilometers over wegtypen (stad, buitenweg, snelweg) en beladingsgraden. Praktijkgegevens m.b.t. luchtverontreinigende emissies zijn in de regel niet beschikbaar uit concrete toepassingen. Deze moeten worden bepaald m.b.v. laboratoriumtests aan voertuigen of motoren, evt. aangevuld met modelberekeningen.

In deze studie is gebruik gemaakt van berekende brandstofverbruikscijfers en emissies die zodanig zijn bepaald dat een consistente vergelijking van EEV-bussen op diesel en aardgas mogelijk is. De berekening is opgedeeld in twee onderdelen:

- Het energiegebruik aan de krukas van beide bussen is bepaald m.b.v. het door TU-Graz ontwikkelde PHEM-model, dat ook het hart vormt van de door TNO gebruikte methodiek voor bepaling van emissiefactoren voor zware voertuigen in Nederland³. Een belangrijke parameter in de simulaties is het verschil in massa tussen beide bussen als gevolg van het extra gewicht van de aardgastanks en een verschil in luchtweerstand. Simulaties zijn uitgevoerd met een voor de Nederlandse situatie representatieve stadsbuscyclus (Dutch Urban Bus Cycle, DUBC).
- Brandstofverbruik en emissies zijn vervolgens berekend door vermenigvuldiging van het energiegebruik aan de krukas (in kWh/km) met het specifieke brandstofverbruik en de specifieke emissies per eenheid door de motor aan de krukas geleverde energie (g/kWh), zoals bepaald op de typekeuringstest van de gebruikte motoren. Typekeuringsdata betreffen emissies over de ETC-cyclus en zijn door MAN ter beschikking gesteld. CO₂-emissies uit de uitlaat zijn berekend door het brandstofverbruik te vermenigvuldigen met de 'CO₂-inhoud' van de brandstoffen.

De in deze studie gepresenteerde cijfers voor emissies en brandstofverbruik betreffen dus voor praktijkgebruik berekende waarden. Deze kunnen enigszins afwijken van de werkelijke praktijkemissies. De ETC-cyclus is weliswaar een dynamisch belastingpatroon, dat is afgeleid uit praktijkgegevens voor zware voertuigen, maar dit belastingpatroon is niet representatief voor stadsbussen. De verschillen tussen de praktijkemissies (zoals die bijvoorbeeld gemeten kunnen worden op een rollenbank) en de op basis van de hier gehanteerde methodiek geschatte waarden kunnen voor beide bustypen verschillend zijn.

³ Zie bijvoorbeeld: Ontwikkeling van het VERSIT+ HD emissiemodel, I.J. Riemersma & R.T.M. Smokers, TNO, 2004.

2.2 Energiegebruik aan de krukas

De energievraag aan de krukas wordt bepaald door ondermeer:

- de massa van de bus;
- de lucht- en rolweerstand;
- het rendement van de versnellingsbak en andere onderdelen van de aandrijflijn.

Voor de in deze studie beschouwde bussen is gerekend met de in Tabel 5 weergegeven getallen. In deze tabel is ook het resulterende energiegebruik aan de krukas weergegeven.

Voor de berekeningen van brandstofverbruik, emissies en kosten wordt uitgegaan van het energiegebruik aan de krukas van bussen met een gemiddelde beladingsgraad van 13 passagiers (CE Delft, 2003), en een gemiddeld gewicht per passagier van 80 kg. Deze beladingsgraad is representatief voor stadsbussen.

Tabel 5 Voertuiggegevens die gebruikt zijn voor bepaling van het energiegebruik aan de krukas van de MAN EEV-bussen op diesel en aardgas alsmede resultaten van de berekening van het energiegebruik aan de krukas

Model	Brandstof	Belading	Aantal passagiers	Massa* [kg]	Energiegebruik [kWh/km]
Lion's City	Diesel	Leeg	0	11.000	1,61
Lion's City	Diesel	Gemiddeld	13	12.120	1,73
Lion's City	Diesel	Halfvol	35	13.800	1,92
Lion's City	Aardgas	Leeg	0	12.200	1,76
Lion's City	Aardgas	Gemiddeld	13	13.320	1,89
Lion's City	Aardgas	Halfvol	35	15.000	2,07

*belading = extra gewicht inclusief bestuurder = (aantal passagiers + 1) * 80 kg.

2.3 Brandstofverbruik en directe emissies

Luchtverontreinigende emissies van voertuigen omvatten koolmonoxide (CO), koolwaterstoffen (HC), stikstofoxiden (NO_x) en fijn stof (PM₁₀). Voor de luchtkwaliteitsproblematiek in Nederlandse steden zijn echter voornamelijk de emissies van NO_x en PM₁₀ relevant, omdat enkel voor deze stoffen in Nederland de EU-grenswaarden voor lokale luchtkwaliteit worden overschreden. Omdat bovendien de emissies van CO en HC door bussen relatief laag zijn⁴, concentreren we ons in deze vergelijking op NO_x en PM₁₀. Daarnaast worden de emissies van CO₂ en methaan (CH₄) vergeleken vanwege de bijdrage van deze stoffen aan het versterkte broeikaseffect.

Tabel 6 geeft een overzicht van de resultaten van de berekening van uitlaatgasemissies en brandstofverbruik van de MAN EEV-bussen op diesel, biodiesel, aardgas en biogas. Voor de berekening hiervan zijn door MAN aangeleverde typekeuringsdata gebruik voor beide motortypen zoals gemeten op de ETC-cyclus.

⁴ Per voertuigkilometer vergelijkbaar met die van moderne personenauto's op benzine.



Bij deze tabel moeten de volgende opmerkingen worden gemaakt:

- Voor berekening van het brandstofverbruik bij rijden op 100% biodiesel (B100) is rekening gehouden met de lagere energie-inhoud van biodiesel t.o.v. gewone diesel.
- Voor de berekening van emissies van NO_x en PM₁₀ is aangenomen dat de NO_x-emissies bij rijden op biodiesel 3% hoger zijn dan bij rijden op gewone diesel, en dat de PM₁₀-emissies 10% lager zijn. Deze getallen zijn gebaseerd op een door TNO uitgevoerde (nog niet gepubliceerde) vergelijking van in de literatuur gerapporteerde testresultaten. Daarbij dient te worden aangetekend dat de spreiding in gerapporteerde effecten tussen verschillende publicaties groter is dan de over alle publicaties gemiddelde waarde van de effecten. Met andere woorden, de impacts van biodiesel (en van verschillende andere vloeibare biobrandstoffen) op de lokale luchtkwaliteit zijn vooralsnog hoogst onzeker. De hier veronderstelde effecten van rijden op biodiesel hebben overigens geen significant effect op de uitkomsten van de vergelijking.
- De berekende CO₂-emissies voor biodiesel betreffen de directe emissies uit de uitlaat. De netto door groei van biomassa uit de atmosfeer opgenomen CO₂-emissies zijn verrekend in de bepaling van de Well-to-Wheel-emissies (zie paragraaf 2.4).
- De directe emissies van rijden op aardgas en biogas zijn gelijk verondersteld omdat is aangenomen dat het gebruikte biogas naar aardgaskwaliteit wordt opgewerkt, danwel dat het biogas wordt ingezet via 'groen gas'-contracten waarbij het gecontracteerde biogas niet fysiek in de motor wordt verbrand.
- Het onderscheid tussen aardgas uit de EU-mix of uit import over 4.000 km en tussen biogas uit afval en mest is voor de in Tabel 6 gemaakte vergelijking van directe emissies niet relevant, maar wel voor de vergelijking van Well-to-Wheel-broeikasgasemissies zoals weergegeven in Tabel 7.

Uit Tabel 6 kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

- Wat betreft emissies van luchtverontreinigende stoffen hebben MAN EEV-bussen op aardgas een voordeel t.o.v. MAN EEV-bussen op diesel door hun zeer lage NO_x-emissies. De NO_x-emissies van de MAN EEV-bussen op aardgas zijn ook zeer laag vergeleken met andere EEV-aardgasbussen (zie o.a. VTT, (2004) en FVT, (2007)).
- De MAN EEV-bussen op diesel zijn de helft schoner dan de MAN EEV-aardgasbussen wat betreft PM₁₀-emissies, maar de emissies van PM₁₀ zijn voor beide brandstoffen zeer laag. De PM₁₀-emissies van aardgasbussen zijn het gevolg van verbranding van smeerolie in de motor en niet gevolg van de verbranding aardgas.
- Het brandstofverbruik in MJ/km is voor aardgas significant hoger dan voor diesel door het lagere rendement van de voor verbranding van aardgas gebruikte Otto-motor en door het hogere gewicht van de bus (als gevolg van aardgastanks). De CO₂-emissies van de aardgasbus zijn desalniettemin van dezelfde orde grootte als van de dieselbus als gevolg van de lagere C/H verhouding van aardgas, waardoor per MJ-energie meer H₂O en minder CO₂ wordt uitgestoten.

- De directe methaanemissies van de aardgasmotor zijn beperkt. Omgerekend met een GWP van 23 komen deze neer op minder dan 1 gram CO₂-equivalenten per kilometer.

Tabel 6 Resultaten m.b.t. directe of Tank-to-Wheel-emissies (direct uit de uitlaat) en brandstofverbruik van MAN EEV-bussen op diesel, biodiesel, aardgas en biogas

Brandstof		Diesel	Biodiesel B100	Aardgas EU-mix	Aardgas 4.000 km	Biogas Afval	Biogas Natte mest
Technologie		EGR+CRT	EGR+CRT	$\lambda = 1$	$\lambda = 1$	$\lambda = 1$	$\lambda = 1$
Model		MAN	MAN	MAN	MAN	MAN	MAN
Motortype		D0836LOH63	D0836LOH63	E2866DUH03/04	E2866DUH03/04	E2866DUH03/04	E2866DUH03/04
Emissies en brandstofverbruik (TTW)							
NO _x	g/km	3,2	3,3	0,6	0,6	0,6	0,6
PM ₁₀	g/km	0,0069	0,0062	0,013	0,013	0,013	0,013
CO ₂	g/km	1.184	1.285	1.233	1.233	1.233	1.233
CH ₄	g/km	0,000	0,000	0,038	0,038	0,038	0,038
Verbruik diesel/biodiesel	l/km	0,45	0,50				
Verbruik aardgas/biogas	m ³ /km			0,69	0,69	0,69	0,69
Brandstofverbruik	MJ/km	16,3	16,3	21,7	21,7	21,7	21,7

NO₂-aandeel in de NO_x-emissies

NO_x is een verzamelterm voor NO en NO₂. De directe schadelijkheid van NO_x-emissies op straatniveau wordt sterk bepaald door het NO₂-aandeel (de NO₂/NO_x-ratio) aan de uitlaat. Luchtkwaliteitsnormen op straatniveau zijn ook uitgedrukt in de concentratie NO₂. Op basis van de beschikbare typekeuringsgegevens kunnen we voor de hier vergeleken bussen geen specifieke uitspraken doen over het aandeel NO₂ in de NO_x-emissies direct uit de uitlaat. Uit metingen aan andere bussen (o.a. VTT, (2004) en TNO, (2003)) is echter wel bekend dat het NO₂-aandeel in de NO_x-emissies van EEV-aardgasbussen zeer laag is (en veelal zelfs nagenoeg nul). Voor EEV-dieselbussen geldt dat de in het roetfilter gebruikte oxidatiekatalysator leidt tot een significante verhoging van het aandeel NO₂ in de NO_x-emissies. TNO, (2007a) meldt voor Euro-5-bussen een NO₂-aandeel van zo'n 12%. Op basis van TNO, (2003) en TNO, (2007b) kan geconcludeerd worden dat dit aandeel stijgt tot zo'n 40% bij gebruik van een roetfilter waarmee op basis van een Euro-5-motor EEV-emissies kunnen worden gerealiseerd. Dit betekent dat zelfs bij gelijke totale NO_x-emissies voor EEV-diesel- en aardgasbussen de impact van EEV-aardgasbussen op de lokale luchtkwaliteit minder is dan die van EEV-dieselbussen als gevolg van de het lagere aandeel NO₂ in de uitlaatgassen van aardgasbussen.



2.4 Well-to-Wheel broeikasgasemissies

Bij vergelijking van verschillende brandstoffen is het met name voor broeikasgasemissies van belang om niet alleen te kijken naar de emissies uit de uitlaat (zgn. 'Tank-to-Wheel' of TTW-emissies) maar ook de emissies in de energieketen van 'Well-to-Tank' (WTT) mee te nemen. De optelsom van beiden levert de zgn. 'Well-to-Wheel' of WTW-emissies op. Deze worden in de regel uitgedrukt in CO₂-equivalenten waarbij verschillende broeikasgassen (in dit geval CO₂, CH₄ en bij verbouwen van biomassa vrijkomend N₂O) onder één noemer worden gebracht m.b.v. hun Global Warming Potential (GWP). In deze studie is voor informatie over de emissies in de productieketen van diesel, biodiesel, aardgas en biogas overgenomen uit Concawe, (2007). De resulterende WTW-broeikasgasemissies zijn weergegeven in Tabel 7.

Voor de in Tabel 7 gepresenteerde cijfers zijn de volgende aannamen gebruikt:

- Voor conventionele diesel is gerekend met WTT-broeikasgasemissies voor winning, transport, raffinage en distributie van 19% van de energie-inhoud van de brandstof (Concawe, 2007).
- Voor 1^e generatie biodiesel⁵ zijn de WTW-broeikasgasreducties afhankelijk van de gebruikte grondstoffen en productiemethode 30 tot 50% lager dan van conventionele diesel (zie o.a. Concawe, (2007) en CE Delft, (2005b)). Hier is gerekend met een WTW-reductie van 40% t.o.v. de conventionele dieselketen.
- De WTW-emissies van aardgas stijgen wanneer het gebruikte aardgas wordt geïmporteerd en over grotere afstanden vervoerd. De optie 'EU-mix' betreft gemiddeld aardgas zoals dat nu in Europa wordt gebruikt, dat bestaat uit deels eigen productie en deels import. De optie '4.000 km' betreft aardgas dat uit bijvoorbeeld Rusland wordt geïmporteerd met een gemiddelde transportafstand van 4.000 km. Omdat Nederland op termijn een netto importeur van aardgas wordt en nieuwe vraag naar aardgas dan dus netto gevoed wordt met extra import, wordt voor de middellange termijn aanbevolen om te rekenen met het getal voor import over 4.000 km.
- Gebruik van 100% biogas in gasbussen leidt tot een reductie van de WTW-broeikasgasemissies van gasbussen van 75% (voor biogas uit afval) tot 200% (voor biogas uit natte mest). De WTW-broeikasgasemissies van biogas uit natte mest zijn negatief doordat het hiervoor gebruikte proces niet alleen gebruik maakt van CO₂-neutrale biomassa maar tevens leidt tot een grote afname van de methaanemissies uit de mestopslag en bij uitrijden van mest over het land.

⁵ Geproduceerd door verestering van plantaardige oliën uit bijv. koolzaad, zonnebloempitten of palmpitten. N.B. Onder biodiesel wordt in dit rapport in alle gevallen veresterde plantenziele verstaan (bijv. uit koolzaad: rapeseed methylester of RME). Pure plantenziele of PPO is geen biodiesel en kan niet worden toegepast in de EEV-dieselbussen.

Tabel 7 Resultaten m.b.t. Well-to-Wheel-broeikasgasemissies van MAN EEV-bussen op diesel, biodiesel, aardgas en biogas

Brandstof		Diesel	Biodiesel B100	Aardgas EU-mix	Aardgas 4.000 km	Biogas Afval	Biogas Natte mest
Technologie		EGR+CRT	EGR+CRT	$\lambda = 1$	$\lambda = 1$	$\lambda = 1$	$\lambda = 1$
Model		MAN	MAN	MAN	MAN	MAN	MAN
Motortype		D0836LOH63	D0836LOH63	E2866DUH03/04	E2866DUH03/04	E2866DUH03/04	E2866DUH03/04
Emissies (WTW)							
CO ₂ -equivalenten	g/km	1.408	840	1.411	1.532	384	-1.596

Uit Tabel 7 kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

- De WTW-broeikasgasemissies van bussen op aardgas zijn vergelijkbaar met die van dieselbussen op basis van ketenemissies voor de gemiddelde EU-mix van bronnen van het gebruikte aardgas. De WTW-broeikasgasemissies van aardgasbussen stijgen met een kleine 10% wanneer uitgegaan wordt van aardgas dat wordt geïmporteerd met een bijbehorende transportafstand van 4.000 km.
- De impact van gebruik van 100% biodiesel op de WTW-broeikasgasemissies van dieselbussen is beperkt tot zo'n 40% reductie en daarmee veel kleiner dan de WTW-emissiereductie die met 100% biogas mogelijk is.

2.5 Externe kosten

Emissies van luchtverontreinigende stoffen leiden tot een scala aan negatieve impacts. Uitlaatgassen van voertuigen dragen bij aan slechte luchtkwaliteit in termen van hoge lokale concentraties van bijvoorbeeld NO₂ en PM₁₀. Verschillende uitlaatgassen dragen ook bij aan de vorming van ozon. Blootstelling aan te hoge concentraties van deze stoffen leidt tot gezondheidsschade bij mensen. Verzurende stoffen in de uitlaatgassen van voertuigen leiden bovendien tot schade aan natuur, gewassen en gebouwen. Deze schade aan bijvoorbeeld gezondheid van mensen en aan gewassen en natuur kan worden gekwantificeerd en uitgedrukt in zogenaamde schadekosten in Euro per kilogram of ton emissie. Deze schadekosten kunnen worden gebruikt om een monetaire waarde te geven aan (vermeden) emissies. De monetaire waarde van emissies is onderdeel van de zogenaamde externe kosten van een handeling (bijv. autorijden) of proces (bijv. het fabriceren van een product). Dit zijn kosten die wel door die handeling of dat proces worden veroorzaakt maar niet door de uitvoerder van die handeling of de eigenaar van dat proces worden gedragen.

Toepassing van het concept externe kosten is zeer gebruikelijk in maatschappelijke kosten-batenanalyses waarin de effecten (kosten en baten) van bijv. voorgenomen beleid of infrastructurele investeringen op economie, welzijn en milieu onder een (monetaire) noemer worden gebracht om verschillende



alternatieven te kunnen vergelijken. Monetarisering van milieu-impacts is dus een nuttig instrument bij het definiëren van kosteneffectief beleid, in dit geval toe te passen op verbetering van lokale luchtkwaliteit door het opnemen van milieueisen in OV-concessies of het kiezen van een specifieke schone aandrijftechnologie voor bussen.

Voor deze studie is gebruik gemaakt van schadekostencijfers uit een project dat door CE Delft en andere partijen in opdracht van de Europese Commissie wordt uitgevoerd (IMPACT, 2007). De gebruikte externe kosten per eenheid emissie zijn weergegeven in Tabel 8. De externe kosten voor NO_x en PM₁₀ gelden voor emissies in stedelijk gebied. De resulterende externe kosten in Euro per gereden kilometer, op basis van TTW-emissies van NO_x en PM₁₀ en WTW-emissies van broeikasgasemissies, zijn voor de verschillende brandstoffen weergegeven in Tabel 9.

De in Tabel 8 opgenomen schadekosten voor NO_x houden geen rekening met het aandeel NO₂ in de uitlaatgassen, omdat volgens de door IMPACT, (2007) geraadpleegde bronnen (o.a. CAFE, (2005)) de directe gezondheidsimpacts van NO₂ onvoldoende bewezen zijn. De gevonden correlaties tussen hoge NO₂-concentraties en bijv. irritatie aan ogen, neus en keel, een lagere longfunctie, toename van astma-aanvallen en ziekenhuisopnamen en een verhoogde gevoeligheid voor infecties worden niet direct aan NO₂ toegeschreven maar aan het mengsel van luchtverontreinigingen waarvoor een hoge NO₂-concentratie een indicator is⁶. Maar omdat NO₂ zo sterk gerelateerd is aan het mengsel van verkeersgerelateerde verontreiniging en er ten gevolge van verkeersemissies wel degelijk negatieve gezondheidseffecten kunnen optreden, zijn ook aan de NO₂-niveaus Europese luchtkwaliteitsnormen gekoppeld

Gezondheidseffecten van NO_x zijn in CAFE, (2005) en IMPACT, (2007) bepaald op basis van de bijdrage van NO_x aan de vorming van ozon en van secundaire deeltjes. Daarnaast zijn negatieve effecten op gewassen meegenomen. Er zijn echter recente aanwijzingen dat NO₂ mogelijk toch directe gezondheidsimpacts heeft. In dat geval zijn de hier gebruikte schadekosten voor NO_x een onderschatting en zouden ze afhankelijk moeten zijn van het NO₂ aandeel in de geëmitteerde NO_x.

Tabel 8 Externe kosten van NO_x, PM₁₀ en CO₂ volgens IMPACT, (2007)

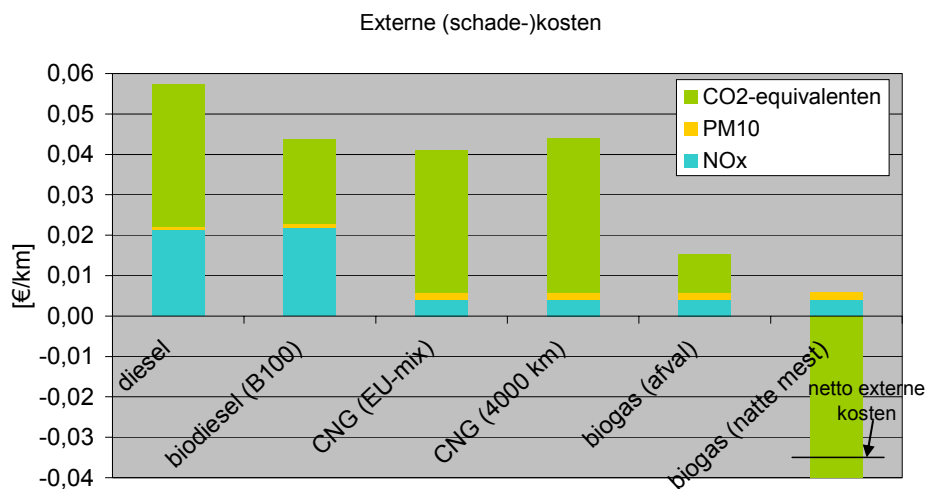
	Externe kosten	
	(€/kg)	(€/ton)
NO _x	6,6	
PM ₁₀	136	
CO ₂	0,025	25

⁶ Zie bijv. <http://www.rivm.nl/milieuportaal/dossier/smog/gezondheidseffect/>.

Tabel 9 Resultaten m.b.t. externe kosten op basis van Tank-to-Wheel-emissies van NO_x en PM₁₀ en Well-to-Wheel-emissies van CO₂ en CH₄ van MAN EEV-bussen op diesel, biodiesel, aardgas en biogas

Brandstof	Diesel	Biodiesel B100	Aardgas EU-mix	Aardgas 4.000 km	Biogas afval	Biogas natte mest	
Technologie	EGR+CRT	EGR+CRT	$\lambda = 1$	$\lambda = 1$	$\lambda = 1$	$\lambda = 1$	
Model	MAN	MAN	MAN	MAN	MAN	MAN	
Motor type	D0836LOH63	D0836LOH63	E2866DUH03/04	E2866DUH03/04	E2866DUH03/04	E2866DUH03/04	
Externe kosten (WTW)							
NO _x	€/km	0,021	0,022	0,004	0,004	0,004	0,004
PM ₁₀	€/km	0,001	0,001	0,002	0,002	0,002	0,002
CO ₂ -equivalenten	€/km	0,035	0,021	0,035	0,038	0,010	-0,040
Totaal	€/km	0,057	0,044	0,041	0,044	0,015	-0,034
Verskil met diesel+EGR	€/km		-0,014	-0,016	-0,013	-0,042	-0,092

Figuur 1 Resultaten m.b.t. externe kosten op basis van Tank-to-Wheel-emissies van NO_x- en PM₁₀- en Well-to-Wheel-emissies van CO₂ en CH₄ van MAN EEV-bussen op diesel, biodiesel, aardgas en biogas



NB: Voor biogas uit natte mest zijn de externe kosten de som van een positieve bijdrage door PM₁₀ en NO_x en een grote negatieve bijdrage van vermeden broeikasgasemissies. De netto milieukosten voor deze optie zijn weergegeven door de zwarte lijn.



3 Resultaten: kosten

3.1 Algemene aannames

Voor de vergelijking van kosten is het van belang om algemene aannames te maken m.b.t.:

- jaarkilometrage van de bussen;
- de concessieduur;
- discontovoet.

De voor deze studie aangenomen waarden zijn weergegeven in Tabel 10. In de berekeningen is uitgegaan van een concessieperiode van acht jaar. Voor afschrijving van de bussen wordt met een restwaarde gerekend (zie paragraaf 3.2), maar voor het aardgasvulstation is aangenomen dat deze over de concessieperiode wordt afgeschreven.

Tabel 10 Algemene aannames voor de kostenvergelijking

Algemene aannames		
Discontovoet	5%	
Concessieduur	8	Jaar
Jaarkilometrage per bus	65.000	Km/jaar

Voor het jaarkilometrage is 65.000 km aangenomen als representatief voor stedelijk gebruik. In CE Delft, (2006) wordt voor stadsbussen gerekend met 64.000 km en voor streekbussen met 77.000 km/jaar. Het jaarkilometrage is sterk afhankelijk van lokale factoren. De invloed van het jaarkilometrage op de vergelijking wordt onderzocht in paragraaf 3.6.5.

3.2 Aanschaf en afschrijving bussen

De in Tabel 11 weergegeven aanschafprijzen zijn door MAN verstrekte indicatieve opgaven. De kosten van bussen hangen, behalve van de aandrijving/brandstof, af van de gewenste uitrusting en indeling en afwerking van het interieur. Belangrijk voor deze vergelijking is vooral het prijsverschil dat wordt bepaald door de meerkosten van de aardgasmotor en de installatie van aardgas-tanks.

De restwaarde is een onzekere factor, m.n. voor aardgasbussen omdat de tweedehands markt voor deze bussen minder goed gedefinieerd is. In CE Delft, (2006) en CVOV, (2005) wordt voor een concessieperiode van acht jaar een restwaarde van 9% van de aanschafprijs aangehouden voor alle typen bussen.

Omdat we hier specifieke MAN-bussen vergelijken, wordt hier uitgegaan van de door MAN Truck & Bus BV voor beide modellen gegarandeerde restwaarde (terugkoopwaarde) van 17,5% op basis van acht jaar gebruik en 75.000 km/jaar.

Voor iedere 10.000 km (over de periode van acht jaar) meer of minder is uitgegaan van een afname c.q. toename van de restwaarde met 0,4%. Op basis van de aangenomen 65.000 km/jaar komt dat neer op een restwaarde van 20,7%

In paragraaf 3.6.1 wordt een gevoeligheidsanalyse uitgevoerd naar de invloed van de aanname m.b.t. restwaarde op de kostenvergelijking.

Tabel 11 Aanschafkosten van MAN EEV-bussen op diesel en aardgas

Aanschafkosten en restwaarde per bus		
MAN Lion's City EEV Diesel		
Aanschafprijs	200.000	€/voertuig
Subsidie EEV-bussen	5.000	€/voertuig
Afschrijvingsperiode	8	jaar
Restwaarde	41.400	€/voertuig
Kapitaalkosten per jaar	23.765	€/jaar
Kapitaalkosten per kilometer	0,37	€/km
MAN Lion's City EEV CNG		
Aanschafprijs	240.000	€/voertuig
Subsidie EEV-bussen	5.000	€/voertuig
Afschrijvingsperiode	8	jaar
Restwaarde	49.680	€/voertuig
Kapitaalkosten per jaar	28.673	€/jaar
Kapitaalkosten per kilometer	0,44	€/km

3.3 Onderhoudskosten

MAN Lion's City-aardgasbussen worden momenteel ingezet in Haarlem. Vanuit deze concessie zijn echter nog geen historisch betrouwbare onderhoudsgegevens beschikbaar. Sinds 2002 rijden vergelijkbare MAN-bussen op aardgas in Frankfurt an der Oder. Uit een presentatie van Stadtverkehrsgesellschaft MBH Frankfurt (Oder) (SVF, 2005) valt op te maken dat de onderhoudskosten van de aardgasbussen minder dan 2 Eurocent per kilometer hoger zijn dan de onderhoudskosten van Euro-3-bussen op diesel.

Voor de hier gepresenteerde kostenvergelijking is uitgegaan van gegevens die door MAN zijn verstrekt en zijn berekend m.b.v. het door MAN gehanteerde rekenprogramma voor onderhoudskosten waarmee ook de kosten voor onderhoudscontracten worden bepaald. De in Tabel 12 aangegeven onderhoudskosten betreffen dus de prijs waarvoor het onderhoud van de bussen door MAN kan worden uitgevoerd. De onderhoudskosten voor de dieselmotoren zijn inclusief onderhoud aan en evt. vervanging van de CRT gedurende de concessieperiode.



Tabel 12 Onderhoudskosten van MAN EEV-bussen op diesel, biodiesel, aardgas en biogas op basis van een concessieduur van acht jaar en een jaarkilometrage van 65.000 km

Vergelijking van onderhoudskosten (€/km)				
Brandstof	Diesel	Biodiesel	Aardgas	Biogas
Technologie	EGR+CRT	EGR+CRT	$\lambda = 1$	$\lambda = 1$
Model	MAN	MAN	MAN	MAN
Onderhoud	0,155	0,165	0,165	0,165

De onderhoudskosten voor aardgasbussen zijn 1 Eurocent per kilometer hoger dan voor dieselbussen. Voor bussen op biodiesel wordt uitgegaan van 1 Eurocent per kilometer meerkosten als gevolg van de hogere frequentie van olie verversen die bij deze brandstof nodig is. Gebruik van biogas leidt niet tot meer onderhoudskosten in vergelijking met aardgas.

De iets hogere onderhoudskosten voor aardgasbussen ten opzichte van dieselbussen worden veroorzaakt doordat er bij aardgasmotoren gebruik wordt gemaakt van het Otto-verbrandingsprincipe met vonkontsteking (in onderhavig geval met 3-weg katalysator). Een Otto-motor heeft bougies die met enige regelmaat moeten worden vervangen. De verstuivers van een dieselmotor hoeven in principe niet vervangen te worden, maar worden vaak wel na 350.000 tot 500.000 gereviseerd, hetgeen ook kosten met zich meebrengt. Verder bevat een aardgasbus (t.o.v. een dieselbus) extra componenten als gasdrukregelaars en een lambda sonde, welke sporadisch vervangen dienen te worden. Tot slot zijn de olieversingsintervallen van een aardgasmotor korter dan voor dieselmotoren. Een belangrijk punt om gasmotoren in goede conditie te houden is het stellen van de kleppen, iets dat bij een dieselmotor veel minder aan de orde is. De mechanische betrouwbaarheid van de diesel- en aardgasmotor zijn in principe vergelijkbaar, omdat beide typen motoren op een gelijk motorblok zijn gebaseerd. De kosten van de componenten die bij een aardgasbus voor periodieke vervanging in aanmerking komen zijn gering, waardoor de meerkosten voor het onderhoud van aardgasbussen met name bepaald worden door het werkplaatsuurtarief en de routine van de monteurs bij het verrichten van de werkzaamheden.

Belangrijk om op te merken is dat de aardgasbussen van MAN gebruik maken van bewezen techniek en dat er reeds jarenlange ervaring mee is opgedaan. Hierdoor is geen sprake van typische aardgasgerelateerde kinderziektes en is verhoogde uitval van voertuigen dus niet meer te verwachten.

3.4 Brandstofkosten

Brandstofkosten per kilometer worden bepaald door de inkoopkosten van brandstoffen, de kosten van vulstations en het brandstofverbruik van de bussen. Deze verschillende aspecten worden hieronder apart beschreven.

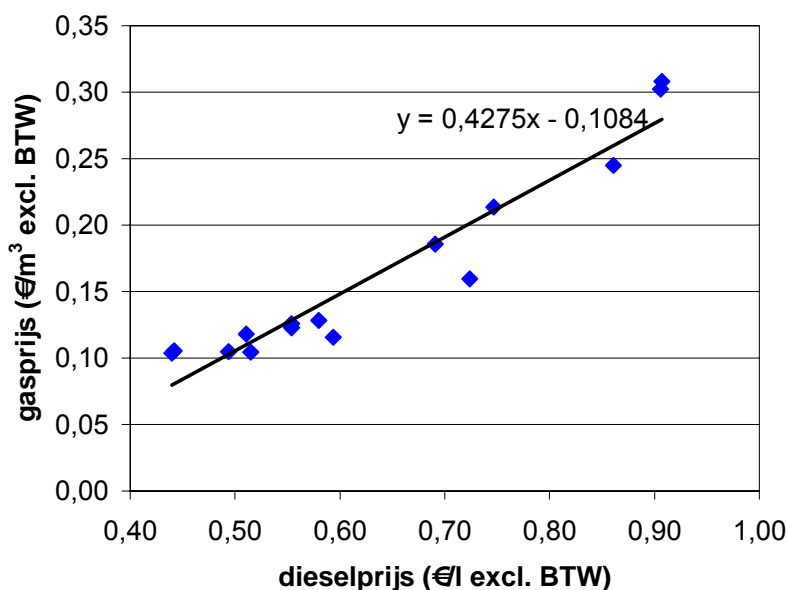
3.4.1 Relatie tussen aardgasprijs en dieselprijs

Het is gevaarlijk om brandstofkosten te vergelijken op basis van de actuele energieprijzen op een gegeven moment. De prijzen voor diesel en aardgas zijn op langere termijn gecorreleerd maar vertonen op korte termijn fluctuaties t.o.v. elkaar. Voor de in dit rapport gepresenteerde vergelijking wordt gebruik gemaakt van de algemene relatie tussen aardgasprijs en dieselprijs die is afgeleid uit Figuur 2. Deze relatie is:

$$\text{gasprijs [€/m}^3\text{]} = 0,4275 \times \text{dieselprijs [€/l]} - 0,1084 \quad (1)$$

Beide prijzen zijn excl. BTW. De gasprijs is inclusief energiebelasting.

Figuur 2 Lange termijn koppeling tussen de aardgasprijs en de dieselprijs op basis van data van TLN⁷ voor de dieselprijs aan de pomp excl. BTW en data van ECN/Eurostat voor de aardgasprijs incl. energiebelasting en excl. BTW voor grootverbruikers (1,3 mln. m³ per jaar)



3.4.2 Kosten van een aardgasvulstation

Voor een aardgasvulstation met een capaciteit van ordegrrootte 1.000 m³/uur, waarmee 20 tot 40 bussen kunnen worden bediend, is uitgegaan van aanschafkosten van € 900.000 per eenheid. Deze kosten zijn in lijn met verschillende bronnen (o.a. mondelinge informatie van DutCH4, CE Delft, (2006), Duinn, (2007)). Het vulstation wordt afgeschreven over de concessieperiode en wordt verondersteld een verwaarloosbare restwaarde te hebben.

⁷ Zie: http://www.tln.nl/Advies_Rit_Diesel.html?id=233.



Op de aanschaf van een aardgasvulstation bestemd voor het op bedrijfsterreinen en inrichtingen afleveren van aardgas als motorbrandstof voor voertuigen zijn de MIA- en VAMIL-regelingen⁸ van toepassing. Onder de MIA-regeling mag voor aardgasvulstations 15% van de investering in mindering worden gebracht op de fiscale winst (winst voor vennootschapsbelasting). Uitgaande van 25,5% vennootschapsbelasting levert dat voor het aardgasvulstation een voordeel op van € 34.425,-. Onder de VAMIL-regeling vallende bedrijfsmiddelen mogen willekeurig ofwel vrij worden afschreven. De VAMIL-regeling biedt vooral een liquiditeits- en rentevoordeel, dat afhangt van de winst van het bedrijf door de tijd heen en dus voor dit concrete voorbeeld lastig is in te schatten. Voor de hier gepresenteerde berekening is aangenomen dat het gecombineerde voordeel van MIA en VAMIL € 50.000,- bedraagt.

De kapitaalkosten per m³ worden berekend door de rente en afschrijving per jaar te delen door de hoeveelheid aardgas die in één jaar door 30 bussen wordt getankt, uitgaande van het brandstofverbruik zoals berekend in paragraaf 2.3 en een jaarkilometrage van 65.000 km per bus.

M.b.t. de kosten voor onderhoud en elektriciteitsverbruik laten verschillende bronnen enige spreiding zien. De hier aangenomen waarden van 0,035 €/m³ resp. 0,03 €/m³ zijn mogelijk aan de voorzichtige (d.w.z. hoge) kant.

De resulterende kosten van het vulstation per geleverde m³ gelden zowel voor gebruik van aardgas als voor biogas.

Tabel 13 Doorberekening van aanschafkosten en onderhoudskosten van een aardgasvulstation op de kosten van getankt aardgas

Berekening kosten vulstation t.b.v. CNG-prijs aan de pomp		
Aanschafprijs CNG-vulstation	900.000	€/unit
Subsidie MIA/VAMIL	50.000	€/unit
Netto investering	850.000	€/unit
Levensduur	8	jaar
Restwaarde	0	€/unit
Aantal voertuigen per vulstation	30	voertuigen
Rente en afschrijving vulstation	131.514	€/jaar
Hoeveelheid getankt aardgas	1.337.314	m ³ /jaar
Kapitaalkosten vulstation	0,098	€/m ³
Onderhoud	0,035	€/m ³
Kosten elektriciteitsverbruik	0,030	€/m ³
Kosten CNG-vulstation	0,163	€/m³

3.4.3 Kosten van dieselpomp

OV-bedrijven krijgen als grootverbruiker een korting op de prijs van diesel. Daar tegenover staan wel meerkosten als gevolg van het zelf exploiteren van een

⁸ Zie: http://www.senternovem.nl/VAMIL_MIA/.

dieselpompstation op eigen terrein. De kosten hiervoor zijn echter beperkt. Op basis van investeringskosten van € 75.000,- per pompinstallatie, een levensduur van 12 jaar en een doorzet van 1.000.000 liter diesel per jaar bedragen de kosten ongeveer 1 Eurocent per liter diesel.

3.4.4 Resulterende brandstofprijzen

De prijs van benzine en diesel is de laatste jaren sterk gestegen. Verwacht wordt dat het huidige hoge prijsniveau nog langere tijd gehandhaafd zal blijven. Voor de vergelijking is uitgegaan van een retailprijs voor diesel van € 1,119,- per liter. Deze prijs is representatief voor de 2^e helft van 2007. Rekening houdend met gebruikelijke grootverbruikerskortingen (zo'n 12 Eurocent per liter t.o.v. de retailprijs excl. BTW) is hiervan de dieselprijs voor OV-bedrijven afgeleid. De aardgasprijs is vervolgens afgeleid met de in paragraaf 3.4.1 toegelichte formule. De berekende totale brandstofprijzen voor de gebruiker van de bussen zijn weergegeven in Tabel 14.

Tabel 14 Brandstofprijzen voor diesel, biodiesel, aardgas en biogas

Brandstofprijzen		
Diesel		
Retailprijs diesel (incl. BTW)	1,12	€/l
Retailprijs diesel (excl. BTW)	0,94	€/l
Korting	0,12	€/l
Kosten eigen dieselpomp	0,01	€/l
<i>Prijs diesel</i>	<i>0,83</i>	<i>€/l</i>
Biodiesel		
Retailprijs biodiesel (incl. BTW)	1,30	€/l
Retailprijs biodiesel (excl. BTW)	1,09	€/l
Korting	0,12	€/l
Kosten eigen dieselpomp	0,01	€/l
<i>Prijs biodiesel</i>	<i>0,98</i>	<i>€/l</i>
Aardgas		
Inkoopprijs aardgas (excl. BTW)*	0,28	€/m ³
Kosten CNG vulstation	0,17	€/m ³
<i>Prijs aardgas</i>	<i>0,45</i>	<i>€/m³</i>
Biogas		
Productiekosten biogas	0,34	€/m ³
Transportkosten	0,06	€/m ³
Energiebelasting	0,03	€/m ³
Kosten CNG-vulstation	0,16	€/m ³
<i>Prijs biogas</i>	<i>0,59</i>	<i>€/m³</i>

*) incl. energiebelasting.

Voor de vaststelling van de retailprijs van biodiesel is gebruik gemaakt van verschillende bronnen⁹. De prijs varieert met de seizoenen en van aanbieder tot aanbieder. Op grond van beschikbare informatie is een gemiddelde prijs aan de

⁹ o.a. www.fuelswitch.nl en informatie van Sunoil.



pomp van € 1,30,- per liter (incl. BTW) geschat. De productiekosten van biogas gelden voor productie uit natte mest en zijn representatief voor productie volgens het CROB-concept¹⁰. In hoofdstuk 2 wordt voor de externe effecten onderscheid gemaakt naar de herkomst van het gebruikte aardgas (EU-mix of volledige import met gemiddeld 4.000 km transportafstand) en biogas (uit afval of natte mest). Omdat de prijzen voor beide brandstoffen als commodityprijzen kunnen worden beschouwd is voor de kostenvergelijking aangenomen dat de herkomst van het gas geen invloed heeft op de prijs. Voor aardgas zijn geen transportkosten opgenomen omdat deze onderdeel uitmaken van de grootverbruikersprijs. Voor biogas zijn wel transportkosten berekend omdat uitgegaan is van de productiekosten als basis. Wanneer biogas wordt ingezet via een 'groen gas'-contract dan zouden deze transportkosten niet meegerekend hoeven worden.

Belangrijk om op te merken is dat op aardgas voor toepassing in voertuigen op dit moment wel een specifieke energiebelasting van 0,03 €/m³ wordt geheven, maar dat er geen accijnzen worden geheven. Invoering van accijns op aardgas op een niveau dat, bijv. per eenheid energie-inhoud, vergelijkbaar is met diesel (zo'n 0,38 €/liter) zou de brandstofkosten voor rijden op aardgas significant verhogen.

Gevoeligheidsanalyses m.b.t. de prijzen van diesel en aardgas worden getoond in paragraaf 3.6.2.

3.4.5 Vergelijking van brandstofkosten

Op basis van de brandstofprijzen zoals weergegeven in Tabel 14 en de brandstofverbruiken zoals berekend in paragraaf 2.3 kunnen de brandstofkosten per kilometer worden berekend. Deze zijn weergegeven in Tabel 15. Voor het brandstofverbruik is uitgegaan van een voor Nederlandse stadsbussen gemiddelde bezettingsgraad van 13 personen (CE Delft, 2003). De berekening van de kosten voor rijden op biodiesel gaat uit van 100% biodiesel. Het energetisch rendement van de motor is bij gebruik van biodiesel gelijk verondersteld aan het rendement bij gebruik van conventionele diesel. Het brandstofverbruik in l/km is voor biodiesel echter hoger als gevolg van de ongeveer 10% lagere verbrandingswaarde van biodiesel.

¹⁰ CROB staat voor de Coalitie Rijden Op Biogas, die bestaat uit vijf marktpartijen (MAN Truck & Bus, MAN Rollo, DMT Milieutechnologie, Geveke Werktuigbouw en Stichting Energy Valley). In het door CROB ontwikkelde concept worden reststoffen en organisch materiaal vergist waardoor biogas ontstaat. Dit biogas wordt opgewerkt tot aardgaskwaliteit en kan direct als Compressed BioGas (CBG) worden gebruikt als brandstof voor OV-bussen en personenauto's. Ook kan het Groene Gas worden geïnjecteerd in het lokale aardgasnet en door gebruikers worden afgenomen middels GroenGas Certificaten.

Tabel 15 Vergelijking van brandstofkosten per km voor MAN EEV bussen op diesel, biodiesel, aardgas en biogas

Vergelijking van brandstofkosten (€/km)					
Brandstof	Diesel	Biodiesel	Aardgas	Biogas	
Technologie	EGR+CRT	EGR+CRT	$\lambda = 1$	$\lambda = 1$	
Model	MAN	MAN	MAN	MAN	
Brandstofverbruik	0,454	0,496			l/km
Brandstofverbruik			0,686	0,686	m ³ /km
Brandstofkosten	0,38	0,49	0,31	0,41	€/km

3.5 Resultaten kostenvergelijking

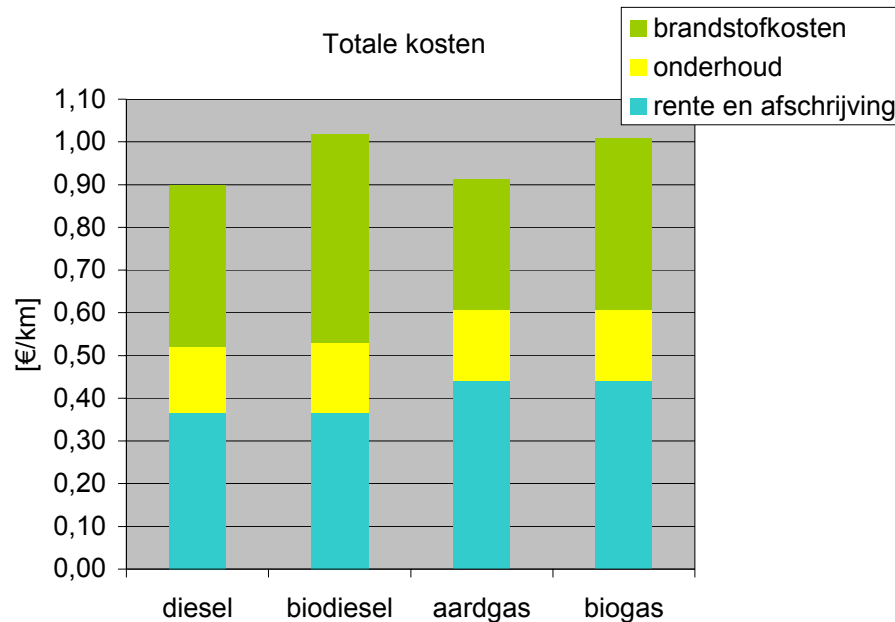
Op basis van de in bovenstaande paragrafen geschatte kostenelementen kunnen de totale kosten per kilometer worden vergeleken voor de vier brandstoffen. De resultaten zijn weergegeven in Tabel 16 en Figuur 3. De berekening van de kosten voor rijden op biodiesel gaat uit van 100% biodiesel waarbij rekening is gehouden met een verhoogd brandstofverbruik in l/km als gevolg van de lagere verbrandingswaarde van biodiesel. Kosten voor rijden op een percentage in conventionele diesel bijgemende biodiesel kunnen worden berekend door middeling van de kosten voor diesel en biodiesel, gewogen met de aandelen in de brandstof.

Tabel 16 Vergelijking van de totale kosten (rente en afschrijving plus onderhoud plus brandstofkosten) voor MAN EEV bussen op diesel, biodiesel, aardgas en biogas

Vergelijking van totale kosten (€/km)				
Brandstof	Diesel	Biodiesel	Aardgas	Biogas
Technologie	EGR+CRT	EGR+CRT	$\lambda = 1$	$\lambda = 1$
Model	MAN	MAN	MAN	MAN
Rente en afschrijving	0,37	0,37	0,44	0,44
Onderhoud	0,16	0,17	0,17	0,17
Brandstofkosten	0,38	0,49	0,31	0,41
Totale kosten	0,90	1,02	0,91	1,01



Figuur 3 Vergelijking van de totale kosten (rente en afschrijving plus onderhoud plus brandstofkosten) voor MAN EEV bussen op diesel, biodiesel, aardgas en biogas



3.6 Gevoeligheidsanalyse m.b.t. kostenvergelijking

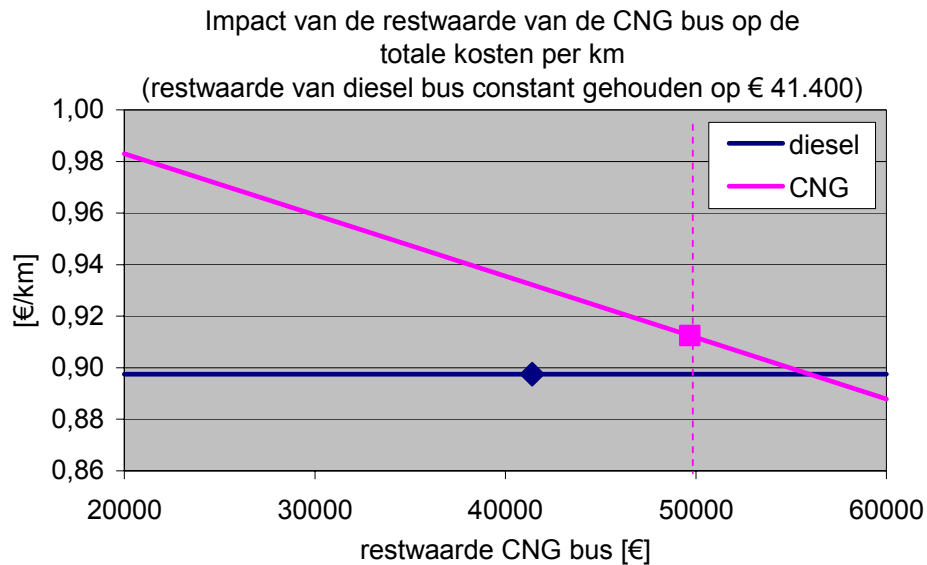
De in bovenstaande paragrafen gebruikte inputgegevens zijn vanzelfsprekend met enige onzekerheid omgeven, kunnen voor verschillende situaties (locaties en toepassingen waar de bussen worden ingezet) verschillend zijn en zullen in de tijd variëren. Om de impact van variaties in de aangenomen inputgegevens op de uitkomst van de kostenvergelijking te onderzoeken worden in onderstaande paragrafen een aantal gevoeligheidsanalyses gepresenteerd.

3.6.1 Restwaarde

De restwaarde van de bussen is een onzekere factor, m.n. voor aardgasbussen. De markt voor 2^e hands dieselbussen is groot, maar 2^e hands aardgasbussen zullen in de regel alleen aangeschaft worden in steden waar al op aardgas gereden wordt of die bereid zijn de overstap naar aardgas te maken.

In de basisberekening is uitgegaan van een restwaarde die voor beide bussen een gelijk percentage van de nieuwprijs is (20,7%, zie paragraaf 3.2). In Figuur 4 wordt aangegeven hoe de kostenverhouding tussen de aardgas- en de dieselbus verandert als functie van de voor de aardgasbus aangenomen restwaarde (bij constante restwaarde voor de dieselbus). Het verschil in de kosten per kilometer neemt toe met zo'n 2 Eurocent per kilometer voor iedere € 10.000,- dat de restwaarde van de gasbus lager is dan de door MAN Truck & Bus BV afgegeven gegarandeerde terugkoopwaarde, bij gelijk gehouden restwaarde van de dieselbus.

Figuur 4 Effect van variatie in de restwaarde van de MAN EEV-aardgasbus op het verschil in kosten met de MAN EEV-dieselbus. De markers geven de in de basisvergelijking aangenomen waarden weer

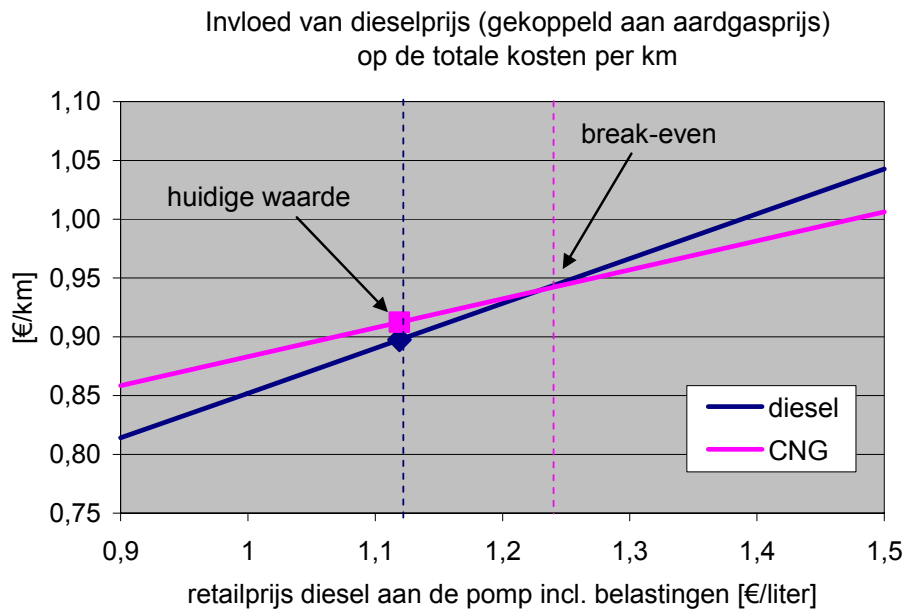


3.6.2 Diesel- en aardgasprijs

De dieselprijs fluctueert in de tijd en zoals aangegeven in paragraaf 3.4.1 volgt de aardgasprijs deze variaties volgens een lineaire afhankelijkheid. Figuur 5 geeft het effect aan van variaties in de dieselprijs en de daaraan gekoppelde aardgasprijs op de vergelijking van totale kosten per kilometer. Ondanks de koppeling leidt een hogere dieselprijs tot lagere meerkosten voor de aardgasbussen. Uit Figuur 5 is op te maken dat een verhoging van de retailprijs van diesel (incl. BTW) met 0,10 €/liter leidt tot een verlaging van het verschil in 'total cost of ownership' van aardgas- en dieselbussen met 1,3 Eurocent per kilometer. Het break-even punt ligt bij een dieselprijs van zo'n 1,23 €/liter (retailprijs aan de pomp incl. BTW).



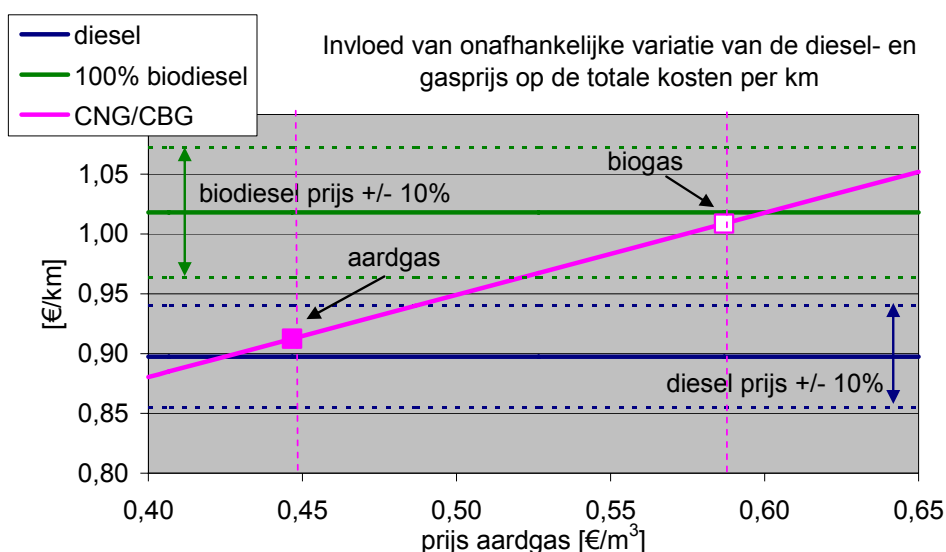
Figuur 5 Invloed van verandering van de dieselprijs (retailprijs aan de pomp) en de daar aan gekoppelde aardgasprijs op de vergelijking van totale kosten per kilometer voor MAN EEV-bussen op diesel en aardgas



Door verschillende omstandigheden kunnen in de tijd variaties optreden in de verhouding tussen de dieselprijs en de aardgasprijs. Daarnaast beïnvloeden onzekerheden in de aangenomen prijzen en de uit statistiek afgeleide relatie (zie paragraaf 3.4.1) de uitkomsten van de vergelijking. Figuur 6 geeft inzicht in de invloed van onafhankelijke variaties in de prijzen van diesel en aardgas op de vergelijking van totale kosten:

- de horizontale ononderbroken donkerblauwe lijn geeft de kilometerkosten van dieselmotoren weer bij een referentie-dieselprijs van 1,119 €/l (retailprijs aan de pomp);
- de gestreepte donkerblauwe lijnen geven de kilometerkosten van dieselmotoren weer bij variatie van de dieselprijs met 10% t.o.v. de referentieprijs;
- de horizontale ononderbroken groene lijn geeft de kilometerkosten van bussen op biodiesel weer bij een biodieselprijs van 1,30 €/l (retailprijs aan de pomp);
- de gestreepte groene lijnen geven de kilometerkosten weer van bussen op biodiesel bij variatie van de biodieselprijs met 10% t.o.v. de referentieprijs;
- de ononderbroken roze lijn geeft de kilometerkosten aan van aardgasbussen als functie van de aardgasprijs (prijs voor de vervoerder, incl. kosten vulstation):
 - de roze marker geeft de kilometerkosten weer bij de in de basisvergelijking gebruikte aardgasprijs van 0,45 €/m³ (incl. kosten vulstation);
 - de witte marker geeft de kilometerkosten weer bij gebruik van 100% biogas bij een aangenomen biogasprijs van 0,59 €/m³ (incl. kosten vulstation).

Figuur 6 Invloed van onafhankelijke variatie van de diesel- en gasprijs op de vergelijking van totale kosten per kilometer voor MAN EEV-bussen op diesel en aardgas (zie tekst voor nadere uitleg)



Uit Figuur 6 kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

- bij constant gehouden dieselprijs heeft de aangenomen waarde van de aardgasprijs een sterke invloed op de meerkosten van aardgasbussen t.o.v. dieselbussen;
- de kosten per kilometer van het gebruik van 100% biogas zijn vergelijkbaar met die van het gebruik van 100% biodiesel.

3.6.3 Afschrijvingsperiode voor CNG-vulstation

In de basisberekening is aangenomen dat het vulstation binnen één concessieperiode van acht jaar volledig wordt afgeschreven. De technische levensduur van de installatie is echter zeker langer dan acht jaar. Wanneer het gebruik van aardgasbussen onderdeel uitmaakt van een langere termijn strategie voor rijden op aardgas, dan is het gerechtvaardigd om te veronderstellen dat het aardgasvulstation ook nog in een volgende concessieperiode kan worden gebruikt. Gaan we uit van een afschrijvingsperiode van twaalf jaar dan worden de kosten van het vulstation verlaagd van 0,163 €/m³ naar 0,136 €/m³. Bij een brandstofverbruik van 0,686 m³/km levert dat dus een verlaging van de kosten van EEV-aardgasbussen op van slechts 0,02 €/km. Dit is vergelijkbaar met de meerkosten van aardgas t.o.v. diesel in de basisvergelijking.

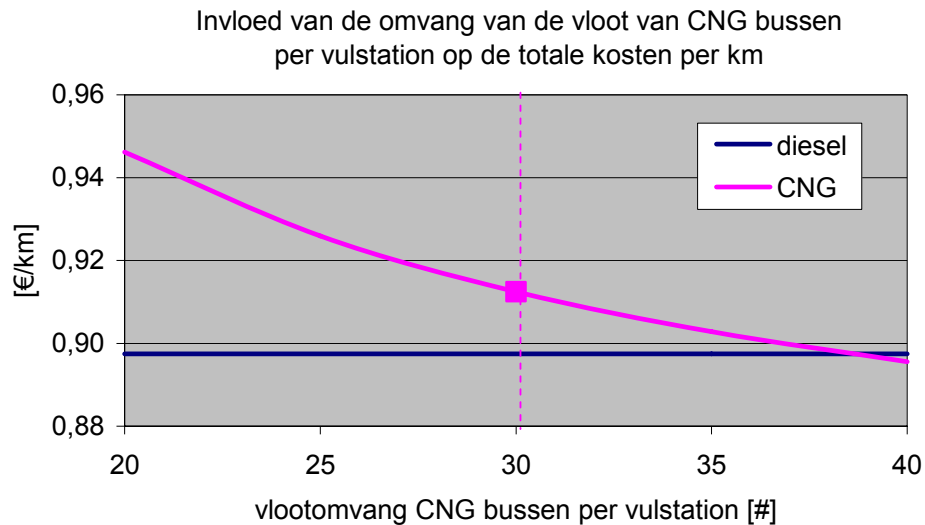
3.6.4 Vlootomvang per vulstation

In de basisvergelijking is aangenomen dat de kosten van een aardgasvulstation worden omgeslagen over de door een vloot van 30 bussen getankte brandstof. Vulstations van deze capaciteit (1.000 m³/uur) kunnen echter 20 tot 40 bussen bedienen. Een andere aanname m.b.t. het aantal bussen leidt tot andere kosten per m³ voor het vulstation. Dit effect is weergegeven in Figuur 7. Bij een volledige



benutting van de capaciteit van het vulstation worden de kilometerkosten van aardgasbussen die van dieselbussen nagenoeg gelijk.

Figuur 7 Invloed van de vlootomvang per vulstation op de kostenvergelijking van MAN EEV-bussen op diesel en aardgas



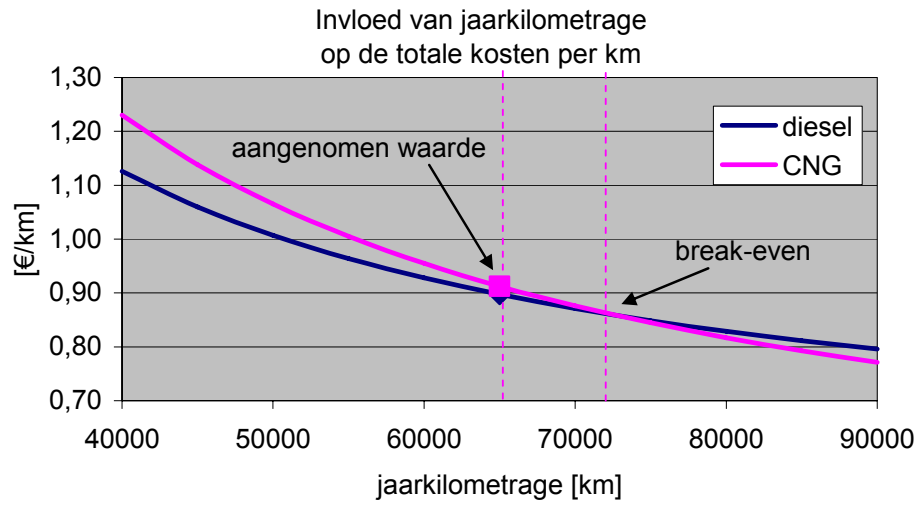
3.6.5 Jaarkilometrage

Het voor de bussen aangenomen jaarkilometrage beïnvloedt de vergelijking van kilometerkosten op drie verschillende manieren:

- via de restwaarde van de bussen na acht jaar gebruik;
- via de over de kilometers omgeslagen kapitaalkosten van de bussen;
- via het totale aardgasverbruik van de vloot van 30 aardgasbussen waarover de aanschaf- en onderhoudskosten van het aardgasvulstation worden omgeslagen.

Het effect van variatie van het aangenomen jaarkilometrage op de vergelijking van kilometerkosten is weergegeven in Figuur 8. Bij hogere jaarkilometrages dan de aangenomen 65.000 km worden de kosten per km lager maar die van aardgasbussen worden sneller lager dan die van dieselbussen. Gegeven alle andere aannamen (m.b.t. ondermeer kosten van voertuigen en brandstoffen) zijn de kosten van beide varianten gelijk bij een jaarkilometrage van zo'n 72.000 km.

Figuur 8 Invloed van het jaarkilometrage per bus op de kostenvergelijking van MAN EEV-diesel- en aardgasbussen



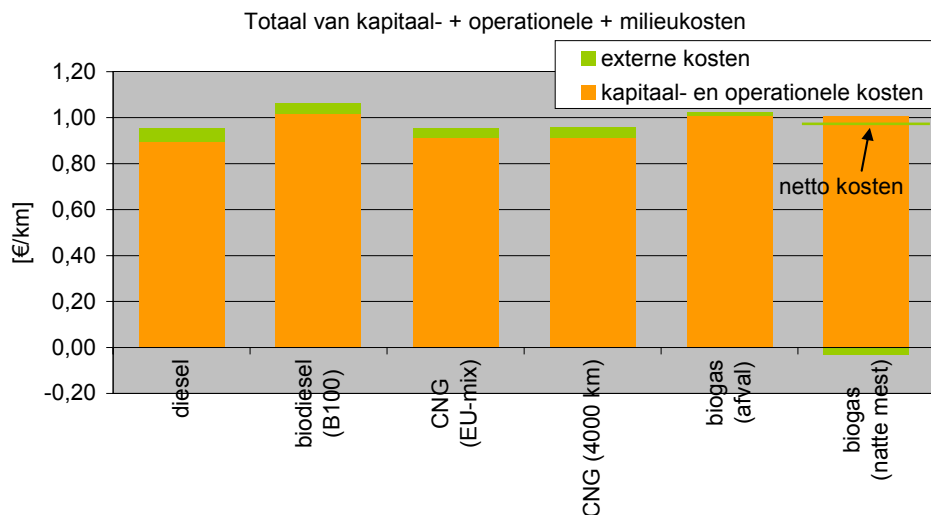
4 Vergelijking van 'total cost of ownership' en milieukosten

De resultaten van hoofdstuk 3 m.b.t. kapitaal- en operationele kosten ('total cost of ownership') en hoofdstuk 2 m.b.t. externe milieukosten kunnen worden gecombineerd tot een totale kostenvergelijking. De resultaten daarvan zijn weergegeven in Tabel 17 en Figuur 9. Het verschil in totale kosten van de verschillende alternatieven t.o.v. diesel is weergegeven in Figuur 10.

Tabel 17 Totaal van kapitaal- + operationele kosten en milieukosten van MAN EEV-bussen op diesel, biodiesel, aardgas en biogas

	Diesel	Biodiesel B100	Aardgas EU-mix	Aardgas 4.000 km	Biogas Afval	Biogas Natte mest
	(€/km)	(€/km)	(€/km)	(€/km)	(€/km)	(€/km)
Kapitaal- en operationele kosten	0,90	1,02	0,91	0,91	1,01	1,01
Externe kosten	0,06	0,04	0,04	0,04	0,02	-0,03
Totaal	0,95	1,06	0,95	0,96	1,02	0,97

Figuur 9 Totaal van kapitaal- + operationele kosten en milieukosten van MAN EEV-bussen op diesel, biodiesel, aardgas en biogas

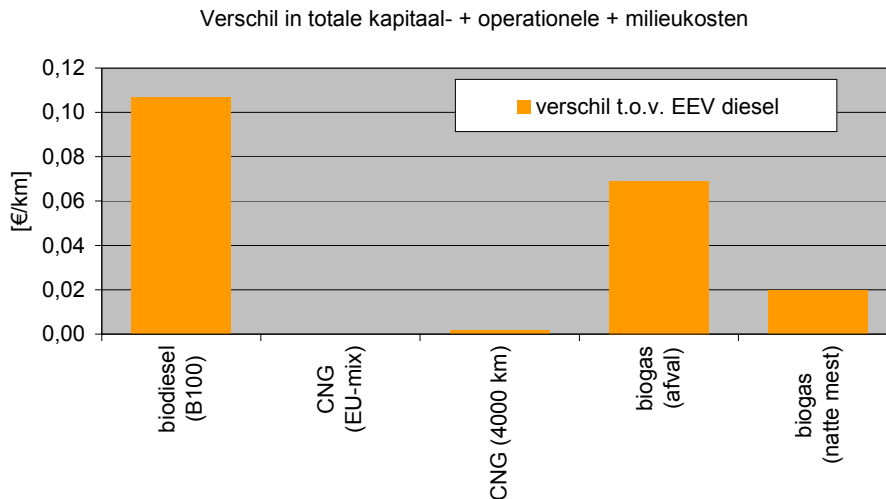


NB: Voor biogas uit natte mest zijn de externe kosten negatief. Het totaal van kapitaal- + operationele kosten en milieukosten voor deze optie is weergegeven door de groene lijn.

Uit Tabel 17, Figuur 9 en Figuur 10 kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

- Op basis van de in deze vergelijking gehanteerde uitgangspunten zijn de 'total cost of ownership' van MAN EEV-bussen op aardgas zo'n 1,5 Eurocent per km hoger dan die van MAN EEV-bussen op diesel.
- Rekening houdend met het verschil in externe milieukosten daalt dit verschil tot nul, m.n. als gevolg van de lagere NO_x-emissies van de MAN EEV-aardgasbussen t.o.v. de MAN EEV-bussen op diesel.
- De 'total cost of ownership' van MAN EEV-bussen op 100% biogas zijn nagenoeg gelijk aan die van MAN EEV-bussen op 100% biodiesel. Door de veel hogere Well-to-Wheel-broeikasgasreductie van biogas t.o.v. biodiesel zijn de externe kosten bij rijden op biogas veel lager dan bij rijden op biodiesel. Gebruik van biogas uit natte mest leidt door de zeer hoge reductie van broeikasgasemissies tot totale kosten ('total cost of ownership' + milieukosten) die slechts 2 Eurocent per km hoger zijn dan voor rijden op diesel en zo'n 9 Eurocent per km lager dan voor rijden op 100% biodiesel.

Figuur 10 Verschil in kapitaal- + operationele kosten en milieukosten van MAN EEV-bussen op biodiesel, aardgas en biogas t.o.v. MAN EEV-bussen op conventionele diesel



Belangrijk om te benadrukken is dat rijden op 100% biodiesel technisch wel mogelijk is maar bezwaren kent, terwijl directe of indirecte inzet van 100% biogas zonder technische problemen mogelijk is en bovendien een veel hogere WTW-broeikasgasreductie oplevert dan rijden op biodiesel. In bovenstaande vergelijking is rijden op 100% biodiesel opgenomen als hypothetisch voorbeeld om de effecten van rijden op biodiesel duidelijk weer te kunnen geven. De kosten en effecten van rijden op een mengsel van biodiesel in conventionele diesel kunnen worden bepaald door de resultaten voor diesel en biodiesel gewogen te middelen met de aandelen van beiden in de gebruikte brandstof. Rijden op diesel met 20% biodiesel bijgemengd verhoogt de 'total cost of ownership' van 0,90 €/km naar 0,92 €/km en levert een WTW-broeikasgasreductie van zo'n 8% t.o.v. conventionele diesel.



5 Conclusies

In dit rapport is een vergelijking gemaakt van de kosten en emissies van door MAN geproduceerde stadsbussen op diesel en aardgas die voldoen aan de EEV-norm. De EEV-dieselbus maakt gebruik van gesloten EGR en een CRT-roetfilter. De aardgasbus heeft een stoichiometrische motor ($\lambda = 1$) en een drieweg-katalysator. In de vergelijking is ook het gebruik van biodiesel en biogas meegenomen. Beide bussen zijn gebaseerd op hetzelfde voertuigplatform (MAN Lion's City), zodat de verschillen in kosten en milieueffecten geheel zijn toe te schrijven aan de gebruikte brandstoffen.

De algemene uitgangspunten voor de vergelijking zijn weergegeven in Tabel 18. De resultaten zijn samengevat in Tabel 19.

Tabel 18 Algemene uitgangspunten voor de vergelijking van MAN EEV-stadsbussen op diesel, biodiesel, aardgas en biogas

Brandstof		Diesel	Biodiesel B100	Aardgas	Biogas
Technologie		EGR+CRT	EGR+CRT	$\lambda = 1$	$\lambda = 1$
Model		MAN	MAN	MAN	MAN
Motortype		D0836LOH63	D0836LOH63	E2866DUH03/04	E2866DUH03/04
Aanschafkosten bus	€/voertuig	200.000	200.000	240.000	240.000
Testwaarde	€/voertuig	41.400	41.400	49.680	49.680
Leeggewicht	kg	11.000	11.000	12.200	12.200
Concessieperiode	jaar	8	8	8	8
Jaarkilometrage	km	65.000	65.000	65.000	65.000
Aanschafkosten aardgasvulstation*	€/unit			900.000	900.000
Restwaarde aardgasvulstation	€/voertuig			0	0
Brandstofprijs diesel/biodiesel**	€/liter	0,83	0,98		
Inkoopprijs aardgas/biogas	€/m ³			0,28	0,34
Brandstofprijs***	€/m ³			0,45	0,59

*) capaciteit 20 tot 40 bussen.

**) netto prijs voor vervoerder (excl. BTW, incl. kortingen).

***) netto kosten voor vervoerder (excl. BTW, incl. energiebelasting, incl. kosten vulstation).

De in dit rapport uitgewerkte vergelijking leidt tot de volgende conclusies:

M.b.t. emissies

- Met betrekking tot luchtverontreinigende componenten worden in deze studie alleen de voor de Nederlandse situatie relevante emissies in beschouwing genomen. Voor stedelijke luchtkwaliteit zijn dat NO_x, NO₂ en PM₁₀.
- Wat betreft emissies van luchtverontreinigende stoffen hebben MAN EEV-bussen op aardgas een voordeel t.o.v. MAN EEV-bussen op diesel door hun zeer lage NO_x en NO₂-emissies.
- De MAN EEV-bussen op diesel zijn de helft schoner wat betreft PM₁₀-emissies, maar de emissies van fijn stof zijn voor beide brandstoffen zeer laag.
- De WTW-broeikasgasemissies van bussen op aardgas zijn vergelijkbaar met die van dieselbussen op basis van ketenemissies voor de gemiddelde EU-mix van bronnen van het gebruikte aardgas. De WTW-broeikasgasemissies van aardgasbussen stijgen wanneer aardgas wordt gebruikt dat is geïmporteerd over grote transportafstanden.
- De impact van gebruik van 100% biodiesel op de WTW-broeikasgasemissies van dieselbussen is beperkt tot zo'n 30 à 40% reductie.
- Gebruik van 100% biogas in gasbussen leidt tot een reductie van de WTW-broeikasgasemissies van gasbussen van 75% (voor biogas uit afval) tot 200% (voor biogas uit natte mest). De WTW-broeikasgasemissies van biogas uit natte mest zijn negatief doordat het hiervoor gebruikte proces niet alleen gebruik maakt van CO₂-neutrale biomassa maar tevens leidt tot een grote afname van de methaanemissies uit de mestopslag en bij uitrijden van mest over het land.

Tabel 19 Resultaten van de vergelijking van MAN EEV-stadsbussen op diesel, biodiesel, aardgas en biogas

Brandstof		Diesel	Biodiesel B100	Aardgas EU-mix	Aardgas 4.000 km	Biogas Afval	Biogas Natte mest
Technologie		EGR+CRT	EGR+CRT	λ = 1	λ = 1	λ = 1	λ = 1
Model		MAN	MAN	MAN	MAN	MAN	MAN
Motortype		D0836LOH63	D0836LOH63	E2866DUH03/04	E2866DUH03/04	E2866DUH03/04	E2866DUH03/04
<i>Kapitaal- + operationele kosten</i>							
Rente en afschrijving	€/km	0,37	0,37	0,44	0,44	0,44	0,44
Onderhoud	€/km	0,16	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17
Brandstofkosten	€/km	0,38	0,49	0,31	0,31	0,40	0,40
<i>Total cost of ownership</i>	€/km	0,90	1,02	0,91	0,91	1,01	1,01
<i>Totaal externe kosten</i>	€/km	0,06	0,04	0,04	0,04	0,02	-0,03
Totale kosten	€/km	0,95	1,06	0,95	0,96	1,02	0,97



M.b.t. kosten

- Op basis van de in deze vergelijking gehanteerde uitgangspunten, inputgegevens en aannames zijn de ‘total cost of ownership’ (som van kapitaal- en operationele kosten) van MAN EEV-stadsbussen op aardgas 1,5 Eurocent per kilometer hoger dan die van MAN EEV-stadsbussen op diesel.
- Verschillende aannames m.b.t. kosten en specifieke gebruiksomstandigheden hebben een significante invloed op de uitkomsten van de vergelijking:
 - Voor de restwaarde van beide bussen is een door MAN gegarandeerde terugkoopwaarde voor beide bussen gehanteerd. M.n. de restwaarde van CNG-bussen kan daar op de vrije markt sterk van afwijken. Een € 10.000,- lagere restwaarde voor de aardgasbus leidt tot een verhoging van de ‘total cost of ownership’ met 2 Eurocent per kilometer.
 - De diesel- en aardgasprijs zijn aan elkaar gekoppeld. Deze koppeling is echter zodanig dat een verhoging van de retailprijs van diesel (incl. BTW) met 0,10 €/liter leidt tot een verlaging van het verschil in ‘total cost of ownership’ van aardgas- en dieselbussen met 1,3 Eurocent per kilometer.
 - Wanneer de gas- en dieselprijs onafhankelijk van elkaar gevarieerd worden leidt een verlaging/verhoging van de gasprijs met 0,05 €/m³ tot een verlaging/verhoging van het verschil in ‘total cost of ownership’ van aardgasbussen t.o.v. dieselbussen met zo’n 3,5 Eurocent per kilometer;
 - Voor de benutting van het aardgasvulstation is uitgegaan van een vloot van 30 bussen en een vulstation met een capaciteit die toereikend is om ’s avonds en ’s nachts 20 tot 40 bussen te vullen. Verhoging van de benutting tot 40 bussen per vulstation leidt tot een verlaging van het verschil in ‘total cost of ownership’ van aardgas- en dieselbussen met zo’n 2 eurocent per kilometer.
 - Voor de stadsbussen is een jaarkilometrage van 65.000 km aangenomen. Dit jaarkilometrage beïnvloedt de uitkomst via de restwaarde en de resulterende afschrijving van de bussen en via de kosten per m³ van het aardgasvulstation. Bij een jaarkilometrage van 72.000 km zijn de kosten van beide bussen aan elkaar gelijk. Bij 55.000 km neemt het verschil toe tot bijna 4,5 Eurocent per kilometer en bij 45.000 km zelfs tot bijna 8 Eurocent per kilometer
- De NO_x-, PM₁₀- en CO₂-emissies van beide bussen kunnen m.b.v. schadekosten worden omgerekend naar zogenaamde externe milieukosten. De externe kosten van EEV-bussen op aardgas zijn zo’n 1,5 Eurocent per kilometer lager dan van EEV-bussen op diesel, m.n. als gevolg van de lagere NO_x-emissies van de MAN EEV-aardgasbussen t.o.v. de MAN EEV-bussen op diesel. Rekening houdend met dit verschil in externe milieukosten daalt het verschil in totale kosten tot nul.
- De ‘total cost of ownership’ van MAN EEV-bussen op 100% biogas zijn nagenoeg gelijk aan die van MAN EEV-bussen op 100% biodiesel. Door de veel hogere Well-to-Wheel-broeikasgasreductie van biogas t.o.v. biodiesel zijn de externe kosten bij rijden op biogas veel lager dan bij rijden op biodiesel. Gebruik van biogas uit natte mest leidt door de zeer hoge reductie van broeikasgasemissies tot totale kosten (‘total cost of ownership’ + externe milieukosten) die slechts 2 Eurocent per km hoger zijn dan voor rijden op diesel en zo’n 9 Eurocent per km lager dan voor rijden op 100% biodiesel.

Algemene opmerkingen

- Op grond van de hierboven beschreven gevoeligheidsanalyse is duidelijk dat de precieze verhouding van de 'total cost of ownership' van MAN EEV-stadbussen op diesel en aardgas sterk afhangt van de specifieke gebruiksomstandigheden en van de werkelijke brandstofkosten. Deze conclusie is ook geldig voor de vergelijking van/met bussen van andere merken.
- Belangrijke elementen die de kostenvergelijking beïnvloeden zijn de restwaarde van de bussen en de onderhoudskosten. Benadrukt dient te worden dat de hier gepresenteerde vergelijking voor beide kostenelementen gebruik maakt van door MAN Truck & Bus BV opgegeven waarden. De restwaarde voor beide bussen betreft een gegarandeerde terugkoopwaarde. De onderhoudskosten zijn de kosten waarvoor MAN Truck & Bus BV een onderhoudscontract aanbieden op basis van de hier gebruikte waarden voor concessieduur en jaarkilometrage van de bussen.
- Algemeen kan echter wel geconcludeerd worden dat voor de door MAN geproduceerde EEV-stadsbussen op diesel en aardgas de totale kapitaal- en operationele kosten dicht bij elkaar liggen.



Literatuur

CAFE 2005

F. Hurley, A. Hunt, H. Cowie, M. Holland, B. Miller, S. Pye and P. Watkiss
Methodology for the Cost-Benefit analysis for CAFE, Volume 2: Health Impact Assessment, AEA Technology, 2005

CE Delft, 2003

H.P. (Huib) van Essen, O. (Olivier) Bello, J.M.W. (Jos) Dings (allen CE), R. (Robert) van den Brink (RIVM)

To shift or not to shift, that the question, The environmental performance of the principal modes of freight and passenger transport in the policy making context
Delft : CE Delft, Bilthoven :RIVM, maart 2003

CE Delft, 2005a

Rens Kortman en Eelco den Boer
Schone bussen in Haaglanden: Drie scenario's doorgerekend
Delft: CE Delft, april 2005

CE Delft, 2005b

Bettina Kampman, Eelco den Boer en Harry Croezen
Biofuels under development: Analysis of currently available and future biofuels and a comparison with biomass application in other sectors
Delft: CE Delft, juni 2005

CE Delft, 2006

A. Schrotten en L.J. Kortmann
Schone bussen voor Brabant, Een doorrekening van verschillende schone alternatieven
Delft: CE Delft, april 2006

Concawe, 2007

Well-to-Wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context

<http://ies.jrc.ec.europa.eu/WTW>

CONCAWE / EUCAR / JRC, final version 2c, maart 2007

CVOV, 2005

Kostenkennallen Openbaar Vervoer
Rotterdam: CVOV (Centrum voor Vernieuwing Openbaar Vervoer), 2005

Duinn, CE Delft, 2007

Age van der Mei, Eelco den Boer en Femke Brouwer
Duurzame GGD Concessieverlening, Eindrapportage
Groningen: Duinn, Delft: CE Delft, september 2007

FVT 2007

S. Hausberger en T. Vuckovic, Forschungsgesellschaft für
Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik mbH
Emissions and Fuel Consumption of Clean City Bus Concepts
Graz, januari 2007

IMPACT, 2007

M. Maibach, C. Schreyer, D. Sutter (INFRAS), H.P. van Essen, B.H. Boon,
R.T.M. Smokers, A. Schroten (CE Delft), C. Doll (Fraunhofer Gesellschaft – ISI),
B. Pawlowska, M. Bak (University of Gdansk)
Internalisation Measures and Policies for All external Cost of Transport
(IMPACT), Deliverable 1: Draft Handbook on estimation of external costs in the
transport sector revised version
INFRAS, CE Delft, Fraunhofer Gesellschaft – ISI, University of Gdansk, 2007

SVF, 2005

Presentatie van Stadtverkehrsgesellschaft MBH Frankfurt (Oder), m.b.t.
ervaringen met MAN CNG bussen, 2005

TNO, 2003

Joep van Ling, Rinie van Helden en Iddo Riemersma
Comparison of particle size distribution and emissions from heavy-duty diesel
engines and gas engines for buses
TNO Automotive, 12th International Scientific Symposium on Transport and Air
Pollution, juni 2003, Avignon

TNO, 2007a

R. Smit, R. van Mieghem, A. Hensema, E. Rabé en A. Eijk
VERSIT+ Emissiefactoren voor Standaardrekenmethode 1 (CAR II), TNO,
rapportnummer MON-RPT-033-DTS-2007-00709, mei 2007

TNO, 2007b

G. Kadijk en R. Verbeek
VDL Ambassador diesel EEV bus: emission measurement and comparison with
other buses, TNO rapport MON-RPT-033-DTS-2007-02723, november 2007

VTT, 2004

Nils-Olof Nylund, Kimmo Erkkilä, Maija Lappi en Markku Ikonen
Transit bus emissions study: comparison of emissions from diesel and natural
gas buses, VTT, rapport nr. PRO3/P5150/04, oktober 2004

VTT, 2007

Nils-Olof Nylund, Kimmo Erkkilä en Tuukka Hartikka
Fuel consumption and exhaust emissions of urban buses: Performance of the
new diesel technology, VTT, research note 2373, februari 2007

