

KANSEN VOOR BRANDSTOFCELLEN IN BEDRIJFSVOERTUIGEN

A.J.M. BOS
A. VAN DEN BOSCH

Verantwoording

De onderhavige studie is uitgevoerd voor de business unit Brandstoffen, Conversie en Milieu (BCM) van het ECN (projectnummer 7.2377). De studie beschrijft de kansen van de brandstofceltechnologie voor mobiele toepassingen in het licht van de huidige en toekomstige beleidsvoornemens en omvat een milieutechnische en economische beoordeling van SPFC-voertuigen ten opzichte van andere aandrijftechnologieën. De studie maakt onderdeel uit van de studie "Demonstratie Brandstofcelbussen in Nederland, Fase I: Haalbaarheid van productontwikkeling en demonstratie" en is mede gefinancierd door de Provincie Noord-Holland en Novem in het kader van de SSZ-regeling.

Abstract

Diesel vehicles contribute significantly to airborne emissions. Vehicles on fuel cells produce no emissions while driving and few emissions occur during the production of hydrogen and during refuelling. Therefore, fuel cells vehicles can contribute to the reduction of environmental impacts due to the transport of people and goods.

This study discusses the possible contribution of fuel cells vehicles in reducing the environmental impacts from freight transport by trucks or vans and passenger transport by buses. This contribution depends on developments regarding fuel cells vehicles and those of alternative technologies. Alternative technologies considered in this study are improved diesel vehicles, hybrid vehicles and vehicles using natural gas.

The study consists of two parts. Part 1 is a qualitative description of the present and future transport policies. Part 2 is a quantitative analysis which is based on the costs of fuels cells systems and alternative technologies in order to achieve NO_x emission reductions. Both parts of the study focus on the next 10 years.

It is concluded that the next 10 years, NO_x emission reductions can be achieved cheaper by improved diesel-vehicles and vehicles on LPG and CNG than by fuel cells vehicles. On the somewhat longer term, fuel cell trucks and buses are able to contribute to NO_x emission reductions for costs comparable to those related to the reduction of NO_x emissions by improved diesel-vehicles. In order to compete with vehicles on LPG, a decrease of the hydrogen price by 50% and a decrease of the fuel cells system costs for buses by 30% are required during the next 10 years.

However, through the introduction of fuel cell vehicles far lower NO_x emissions and noise levels can be achieved than by the alternative technologies. Only by using hybrid trucks and buses, comparable emissions and noise reductions may be achieved. By the year 2010, the price of hybrid buses and fuel cells buses are expected to be more or less equal.

The best chances for fuel cells systems in vehicles are present in the bus fleet.

INHOUD

1. INLEIDING	9
1.1 Aanleiding	9
1.2 Opzet studie	9
1.3 Werkwijze	10
1.4 Leeswijzer	11
2. CONCURRERENDE TECHNOLOGIEËN	13
2.1 LPG	13
2.2 CNG	13
2.3 Verbeterde dieselmotoren	14
2.4 Hybride voertuigen	14
3. HUIDIG EN TOEKOMSTIG BELEID IN HET VERKEER EN VERVOER	17
3.1 Inleiding	17
3.2 Nationale beleidsmaatregelen met mogelijk positief effect	17
3.2.1 Regelgeving	17
3.2.2 Stimulering	18
3.2.3 Onderzoek	19
3.3 Nationale beleidsmaatregelen met mogelijk negatief effect	20
3.4 Maatregelen op gemeentelijk niveau	21
3.5 Conclusies	22
4. BRANDSTOFCELAANDRIJVINGEN EN CONCURRERENDE TECHNOLOGIEËN	23
4.1 Inleiding	23
4.2 Milieutechnische beoordeling	24
4.3 Economische beoordeling	25
4.4 Kosten en brandstofverbruik brandstofcelsystemen in bestelauto's, vrachtwagens en bussen	27
4.4.1 Bestelauto's	27
4.4.2 Vrachtwagens	28
4.4.3 Bussen	29
4.5 Integrale beoordeling	29
4.5.1 Opzet basisanalyses en gevoeligheidsanalyses	29
4.5.2 Resultaten basisanalyses en gevoeligheidsanalyses	31
4.5.3 Noodzakelijke kostenreducties	35
4.6 Conclusies	38
5. MARKTKANSEN VOOR BRANDSTOFCELAANDRIJVING	41
REFERENTIES	45
BIJLAGE A KOSTEN	47
BIJLAGE B EMISSIES	53

BIJLAGE C RESULTATEN SCENARIO'S 2003	57
BIJLAGE D RESULTATEN SCENARIO'S 2008	61

SAMENVATTING

Het belangrijkste voordeel van brandstofcelsystemen voor mobiele toepassingen is de milieuwinst die ermee behaald kan worden. Die milieuwinst betreft zowel de reductie in emissies als de reductie van geluidhinder. Andere technologieën dan de brandstofceltechnologie kunnen echter eveneens bijdragen aan de afname in milieubelasting. De kansen voor de brandstofceltechnologie om in het wegvervoer een plaats te veroveren hangen derhalve mede af van de (verwachte) ontwikkeling van deze concurrerende technologieën.

De hiervoor liggende studie bestaat uit twee delen. Deel 1 beschrijft de kansen van de brandstofceltechnologie voor mobiele toepassingen in het licht van de huidige en toekomstige beleidsvoornemens en is kwalitatief van aard. Deel 2 van de studie is een milieutechnische en economische beoordeling van SPFC-voertuigen ten opzichte van diverse andere aandrijftechnologieën en is kwantitatief van aard.

De kansen zijn bestudeerd in de volgende marktsegmenten binnen de transportsector:

- het goederenvervoer per bestelauto,
- het goederenvervoer per vrachtwagen,
- het personenvervoer per bus.

De concurrerende aandrijftechnologieën die zijn beschouwd zijn:

- verbeterde dieselmotoren,
- gasmotor (LPG/CNG),
- hybride systemen.

Voor het brandstofcelsysteem wordt uitgegaan van waterstof als brandstof. Deze keuze is voornamelijk bepaald door de beschikbaarheid aan data. Voor H₂-brandstofcelbussen is de 'proof-of-principle' reeds geleverd door Ballard en Mercedes. Men dient evenwel in de gaten te houden dat huidige ontwikkelingen erop gericht zijn 'normale' brandstoffen aan boord om te zetten in voor de brandstofcel bruikbare H₂. Daarmee moet het op termijn mogelijk zijn om met behoud van 'zero-emission' eigenschappen, de goedkope brandstoffen LPG en diesel te gebruiken voor brandstofcelvoertuigen.

Het huidige en toekomstig beleid in het verkeer en vervoer

Het huidige en toekomstig milieubeleid wordt beschreven op basis van het 'Nationaal Milieubeleidsplan (NMP)', het 'Tweede Structuurschema verkeer en vervoer', en de nota's 'Voertuigtechniek en brandstoffen', 'Samen werken aan bereikbaarheid', 'Transport in balans' en 'Milieu en economie'. De nota's bevatten veel maatregelen die indirect gevolgen kunnen hebben op de toepassing van alternatieve brandstoffen en aandrijftechnologieën. De gevolgen van dergelijke maatregelen op de invoering van voertuigen op brandstofcellen worden in deze studie besproken.

De milieutechnische en economische beoordeling

De milieutechnische en economische beoordeling is uitgevoerd voor het jaar 2003 en 2008. Met betrekking tot de kostenontwikkeling is voorbij het jaar 2008 gekeken. De verwachte emissiekenmerken van LPG, CNG en dieselveertuigen die in de jaren 2003 en 2008 beschikbaar komen zijn uitgewerkt in een tweetal scenario's. De ver-

wachte emissies van voertuigen op brandstofcellen zijn afgeleid uit [9]. Deze emissies zijn geen emissies van de voertuigen maar emissies die ontstaan bij de installatie waar het aardgas wordt omgezet in waterstof en de voertuigen waterstof tanken. Voor de economische beoordeling wordt ervan uitgegaan dat de SPFC-voertuigen duurder zijn en tot 10 jaar vanaf nu duurder blijven dan de alternatieven. De economische beoordeling vindt plaats op basis van de kosten voor bedrijfsvoering welke bestaan uit variabele en vaste kosten. Basis voor de integrale vergelijking is de verhouding tussen de milieuprestatie en de kosten.

Uitgangspunt voor de integrale analyse is dat moet worden voldaan aan de toekomstige NO_x-normen. Daar het voldoen aan deze emissienormen als meest lastig ervaren wordt is aangenomen dat indien aan de NO_x-normen wordt voldaan, de overige emissies ook onder de norm zullen blijven. Evenzo is aangenomen, dat voertuigen die middels extra investeringen voldoen aan de NO_x-emissies, eveneens voldoen aan de toekomstige normen voor de overige emissies.

In de integrale analyse worden de diverse aandrijftechnologieën met de verbeterde dieseltechnologie vergeleken; de meerkosten van de alternatieve aandrijftechnologieën worden afgezet tegen de extra afname van de emissies ten gevolge van de inzet van de alternatieve aandrijftechnologieën. De reductiekosten worden vergeleken met de investeringen die moeten worden gedaan om dieselveertuigen aan de toekomstige Euro3- en Euro4-normen te laten voldoen.

Berekeningen zijn uitgevoerd voor twee scenario's, het scenario RIVM/DAF en het scenario Euro. De emissies in het Euro-scenario zijn emissies overeenkomstig de Euro-wetgeving. De emissies in het RIVM/DAF-scenario weerspiegelen de werkelijke emissies. Berekeningen zijn uitgevoerd voor de jaren 2003 en 2008; dit levert een drietal basisanalyses op. (Voor het RIVM/DAF-scenario kan wegens datagebrek geen analyse worden uitgevoerd voor 2008). Daarnaast zijn een aantal aanvullende analyses, waaronder een aantal gevoeligheidsanalyses, uitgevoerd.

Resultaten en discussie: het huidig en toekomstig beleid in het verkeer en vervoer

Er zijn weinig beleidsmaatregelen die direct gericht zijn op toepassing of onderzoek naar alternatieve brandstoffen en aandrijftechnologieën. Wel bevatten beleidsnota's veel maatregelen die indirecte gevolgen kunnen hebben op de toepassing van alternatieve brandstoffen en aandrijftechnologieën.

Indirecte maatregelen met positieve gevolgen zijn de voorgenomen aanzienlijke reducties van diverse emissies (NO_x, VOS, CO, deeltjes en CO₂) en geluid door voertuigen, de stimulering van de toepassing van voertuigen die rijden op alternatieve brandstoffen, en het feit dat de overheid diverse onderzoeksprogramma's heeft geïnitieerd die zorgen voor de financiering van technologieontwikkeling in de vervoerssector. Qua alternatieve brandstoffen liggen de prioriteiten bij LPG en CNG, qua alternatieve technologieën bij elektrisch en hybride voertuigen. Voertuigen op brandstofcellen komen in de regelingen niet als afzonderlijke categorie voor. Dit kan in de nabije toekomst veranderen. (In wezen is een voertuig op brandstofcellen echter een speciale uitvoering van een elektrisch voertuig.)

Indirecte beleidsmaatregelen met mogelijk negatieve gevolgen voor de brandstofceltechnologie zijn het feit dat de overheid de toepassing van gasvormige brandstoffen als LPG en CNG momenteel nadrukkelijk bevordert en maatregelen die het huidige vrachtverkeer faciliteren. Denk hierbij aan het in gebruik stellen van spits- en vrachtwagenstroken en het medegebruik van busbanen door vrachtverkeer; in beide situaties komt de dieselmotor (energetisch gezien) optimaal tot zijn recht. Deze negatieve gevolgen gelden overigens met name voor de korte termijn. Op de lange termijn kan de brandstofceltechnologie mogelijk profiteren van de aandacht voor alternatieve brandstoffen hetgeen in wezen ook aan het stimuleren van brandstoffen als LPG en CNG ten grondslag ligt.

Resultaten en discussie: milieutechnische en economische beoordeling

Geconcludeerd kan worden dat het terugdringen van voertuigemissies op een termijn van 10 jaar en op basis van brandstofcellen systemen duurder is dan op basis van verbeterde diesel, LPG en CNG.

Echter, tegen het jaar 2010 kunnen brandstofcellen systemen een bijdrage leveren aan *verdere* emissiereducties door vrachtwagens en bussen. De kosten van reductie op basis van brandstofcellen systemen in 2010 liggen een weinig hoger dan de kosten van reductie op basis van de verbeterde dieseltechnologie in het jaar 2008. Wellicht dat de emissienormstelling zich tegen die tijd dan ook richt op emissies die met voertuigen met brandstofcellen systemen haalbaar zijn. Voor bestelauto's ligt een dergelijke ontwikkeling minder voor de hand daar de reductiekosten op basis van verbeterde dieselvoertuigen vele malen lager liggen dan de reductiekosten op basis van bestelauto's met brandstofcellen systemen.

Met voertuigen op brandstofcellen kunnen emissiereducties worden bereikt die aanzienlijk hoger liggen dan wat kan worden bereikt met verbeterde diesel, LPG en CNG voertuigen. Slechts hybride vrachtwagens en bussen (in een diesel elektrische uitvoering) kunnen mogelijk aan vergelijkbare emissie-eisen voldoen als de vrachtwagens en bussen uitgevoerd met brandstofcellen systemen. Hybride bussen zijn tegen het jaar 2010 naar verwachting voor vergelijkbare prijzen verkrijgbaar als voertuigen met brandstofcellen systemen. Additionele voordelen van beide voertuigtypen en marketingstrategieën zullen derhalve mede bepalen of en welk voertuigtype een marktaandeel kan veroveren.

LPG en CNG voertuigen zijn bij hoge gewenste emissiereducties geen concurrent voor voertuigen met brandstofcellen systemen. Bij lagere gewenste emissiereducties wel. Aanzienlijke dalingen van de brandstofkosten en de investeringskosten zijn noodzakelijk wil de inzet van voertuigen op brandstofcellen systemen met als doel de NO_x-emissies te reduceren even kosteneffectief als de inzet van voertuigen op LPG. Bij een daling van de waterstofprijs met 50% tussen nu en 2008 zijn in de marktsegmenten bussen en bestelauto's afnamen van de investeringskosten noodzakelijk die zeer wel mogelijk worden geacht. Gezien de inspanningen van grote automobielabrikanten zoals Daimler Benz, Chrysler, Ford Mazda e.a. om in 2004 een commerciële brandstofcelauto op de (vermoedelijk Californische) markt te brengen is het niet onrealistisch dat in 2008 voertuigen met brandstofcellen systemen beschikbaar zijn die nog 'slechts' 30% duurder zijn dan de dan beschikbare dieselveertuigen. Tezamen met de daling van de water-

stofprijs, die eveneens voor mogelijk wordt gehouden, maakt dit de brandstofceltechnologie concurrerend met de LPG-technologie.

Een additioneel voordeel van voertuigen met brandstofcellen, maar ook van hybride voertuigen, ten opzichte van voertuigen op LPG en CNG voertuigen is dat geluidhinder drastisch kan worden beperkt door de inzet van elektrische voertuigen en voertuigen op brandstofcellen terwijl geluidhinder slechts in beperkte mate kan worden teruggedrongen door de inzet van LPG en CNG voertuigen of verbeterde dieselveertuigen.

Er kan worden geconcludeerd dat bij beleid waarin ingezet wordt op verder emissiereductie door voertuigen op een termijn van 10 jaar, er kansen bestaan voor brandstofcellen in mobiele toepassingen. Deze kansen lijken het grootst voor de toepassing in bussen.

1. INLEIDING

1.1 Aanleiding

De aanleiding voor het project 'SPFC (Solid Polymer Fuel Cell) voor wegtransport' is een initiatief dat genomen is door een busoperator (NZH), een busbouwer (Den Oudsten Bussen), een systeembouwer (STORK SPE) en een kennisinstituut (ECN-BCM). Dit initiatief is gericht op het tot stand brengen van een Nederlandse industriële competentie op het gebied van het ontwerpen en het bouwen van brandstofcelssystemen voor wegvoertuigen. Een eerste werkdoelstelling van het initiatief is het realiseren en bedrijven van een aantal brandstofcelbussen in het jaar 2002. In de wetenschap dat de brandstofcelssystemen vooralsnog duurder zullen zijn dan conventionele aandrijfsystemen, moet voor de introductie gezocht worden naar zogenaamde 'market entry points'.

1.2 Opzet studie

Het belangrijkste voordeel van brandstofcelssystemen voor mobiele toepassingen is de milieuwinst die ermee behaald kan worden. Die milieuwinst betreft zowel de reductie in emissies als de reductie van geluidhinder. Met name op stadsniveau, daar waar de meeste mensen wonen en de hinder ten gevolge van het vervoer van personen en goederen het grootst is, is deze reductie gewenst. Andere technologieën dan de brandstofceltechnologie kunnen echter eveneens bijdragen aan de afname in milieubelasting. De kansen voor de brandstofceltechnologie om in het wegvervoer een plaats te veroveren hangen derhalve mede af van de (verwachte) ontwikkeling van deze concurrerende technologieën.

De studie bestaat uit twee delen. Deel 1 beschrijft de kansen van de brandstofceltechnologie voor mobiele toepassingen in het licht van de huidige en toekomstige beleidsvoornemens en is kwalitatief van aard. Deel 2 van de studie is een milieutechnische en economische beoordeling van SPFC-voertuigen ten opzichte van diverse andere aandrijftechnologieën en is kwantitatief van aard.

De studie uitgevoerd door ECN-BS richt zich op de volgende segmenten binnen de transportsector:

- goederenvervoer per bestelauto,
- goederenvervoer per vrachtwagen,
- personenvervoer per bus.

In beginsel worden de volgende alternatieve aandrijftechnologieën beschouwd:

- verbeterde dieselmotoren,
- gasmotor (LPG/CNG),
- hybride systemen.

Voor het brandstofcelsysteem wordt uitgegaan van waterstof als brandstof. Deze keuze is voornamelijk bepaald door de beschikbaarheid aan data. Voor H₂-brandstofcelbussen is de 'proof-of-principle' reeds geleverd door Ballard en Mercedes. Men dient evenwel in de gaten te houden dat huidige ontwikkelingen erop gericht zijn 'normale' brandstoffen aan boord om te zetten in voor de brandstofcel bruikbare H₂. Daarmee moet het op termijn mogelijk zijn om met behoud van 'zero-emission' eigenschappen, de goedkope brandstoffen LPG en diesel te gebruiken voor brandstofcelvoertuigen.

1.3 Werkwijze

Huidig en toekomstig nationaal beleid

In deel 1 van de studie is aan de hand van een aantal nota's het huidige overheidsbeleid en toekomstig te verwachten overheidsbeleid bestudeerd. Aangegeven wordt of in het licht van deze beleidsvoornemens in de nabije toekomst beleidswijzigingen te verwachten zijn die de ontwikkeling van de brandstofceltechnologie, dan wel die van concurrerende technologieën, dan wel die van beide, stimuleren.

Milieutechnische en economische beoordeling

In deel 2 van de studie wordt de milieuprestatie van de SPFC-voertuigen en de alternatieven (milieutechnische beoordeling) gerelateerd aan de kosten die deze technologieën met zich meebrengen (economische beoordeling). De kosten zijn de kosten voor bedrijfsvoering. Ze zijn opgebouwd uit variabele kosten (zoals bijvoorbeeld de kosten van de inkoop van brandstof en het afsluiten van een verzekering) en vaste kosten (zoals de aanschafkosten). In de milieutechnisch/economische beoordeling wordt de verhouding tussen milieuprestatie en kosten vergeleken met dezelfde verhouding voor concurrerende technologieën.

Coëfficiënten die de verhouding weergeven tussen de milieuprestatie en de kosten kunnen richting geven aan besluitvorming op het niveau van de nationale overheid. De kosten die gepaard gaan met de reductie van emissies door voertuigen worden in dat geval beschouwd als kosten die door de maatschappij (deels) kunnen worden gedragen met als doel de landelijke emissies ten gevolge van transport terug te dringen; potentiële bedrijfsvoeringskosten van de vervoermaatschappijen worden beschouwd als zulke maatschappelijke reductiekosten. Op basis van de milieuprestatie kosten coëfficiënten kunnen overheden besluiten tot het afkondigen van wetgeving of het in het leven roepen van subsidieregelingen, met als doel de introductie van bepaalde typen voertuigen te stimuleren. De besluiten van vervoersmaatschappijen omtrent de aanschaf van diverse typen voertuigen zullen niet direct beïnvloed worden door de milieuprestatie kosten coëfficiënten.

De maatschappelijke reductiekosten kunnen wederom richting geven aan het vaststellen van emissienormen. Emissienormen worden beïnvloed door wat de betrokken partijen als realistisch/haalbaar beschouwen. De verwachte kosten van noodzakelijke strengere maatregelen om aan bepaalde emissienormen te kunnen voldoen bepalen mede of normen al dan niet worden beschouwd als realistische c.q. haalbaar.

De milieutechnische en economische beoordeling is uitgevoerd voor het jaar 2003 en 2008. Voor de milieutechnische beoordeling wordt aangenomen dat de voorgenomen

Euro3- en Euro4-wetgeving voor dieselloertuigen voor het jaar 2000 en 2005 (dit is emissiewetgeving op Europees niveau) in de jaren 2003 en 2008 daadwerkelijk wordt doorgevoerd. Met betrekking tot de kostenontwikkeling is voorbij het jaar 2008 gekeken. Voor de economische beoordeling wordt ervan uitgegaan dat de SPFC-voertuigen duurder zijn en tot 10 jaar vanaf nu duurder blijven dan de alternatieven. Bij het voldoen aan de toekomstige emissiewetgeving wordt het voldoen aan de NO_x-normen als uitgangspunt genomen. Daar het voldoen aan deze normen als meest lastig ervaren wordt, is het uitgangspunt van deze studie dat indien aan de NO_x-normen voldaan wordt, de overige emissies ook onder de norm zullen blijven.

1.4 Leeswijzer

Hoofdstuk 2 behandelt de met brandstofcellen concurrerende aandrijfsystemen. Hoofdstuk 3 gaat in op deel 1 van de studie en bespreekt huidig en toekomstig nationaal beleid in het verkeer en vervoer dat ten gunste van brandstofcelsystemen kan werken of juist de introductie van brandstofcelsystemen kan tegengaan. Hoofdstuk 4 omvat deel 2 van deze studie en bespreekt de (kwantitatieve) milieutechnische en economische beoordeling. Hoofdstuk 5 vat tot slot kort de hoofdconclusies samen.

2. CONCURRERENDE TECHNOLOGIEËN

Dit hoofdstuk bespreekt enkele voor- en nadelen van aandrijftechnologieën die met brandstofcelsystemen voor mobiele toepassingen concurreren. De voornaamste bronnen waar uit is geput zijn [1] en [2].

2.1 LPG

LPG is een mengsel van propaan en butaan en is een bijproduct van olie- en aardgaswinning en olieraffinage. Vanwege de lagere NO_x-emissies is LPG een aantrekkelijk alternatief voor diesel. Wanneer LPG als brandstof wordt gebruikt en niet meer afgekeld wordt, betekent dit tevens een forse reductie van CO₂-emissies. LPG als brandstof heeft echter ook nadelen. Voertuigen verliezen vermogen als ze overschakelen van diesel op LPG. Door deze verminderde prestatie ligt substitutie van diesel door LPG meer voor de hand voor voertuigen met lage dan met hoge laadvermogens. Daarnaast belemmeren veiligheidsrisico's de introductie van LPG.

LPG wordt tot nu toe voornamelijk in personenvoertuigen toegepast. Er bestaan echter ook kleine LPG-vrachtwagens waarvan de NO_x-emissies zo'n 70% lager zijn dan van vergelijkbare dieselvrachtwagens. Een additioneel voordeel is dat een LPG-vrachtwagen bij stationair draaien 10 dB stiller is dan de dieselversie.

Om LPG nationaal en internationaal op grote schaal toe te passen is een fors stimuleringsprogramma van de overheid nodig en moeten er fondsen beschikbaar worden gemaakt voor investeringen in de infrastructuur. In Nederland is al een infrastructuur aanwezig en stimuleert de overheid de ontwikkeling inderdaad. In weinig andere landen wordt echter aan deze voorwaarden voldaan, waardoor deze relatief eenvoudige optie voor substantiële reductie van voertuigemissies daar op korte termijn geen noemenswaardige bijdrage zal leveren.

2.2 CNG

Bij verbranding van aardgas worden geen deeltjes gevormd. Daarnaast bevat aardgas nauwelijks zwavelverbindingen en zijn de NO_x- en VOS-emissies inherent laag. Aardgas is ook aantrekkelijk vanwege de lage CO₂-ketenemissies. Het totale effect van aan de ene kant een laag koolstofgehalte in de brandstof en aan de andere kant de extra energie die nodig is voor het vervoer van de relatief zware tank en voor het opslaan van het gas onder hoge druk is een CO₂-reductie van 20% voor de totale keten.

De opslag van aardgas in grote hoeveelheden aan boord van een voertuig is het voornaamste technische probleem van aardgas als alternatieve brandstof. De opslagcapaciteit van aardgas is groter in het geval van vloeibare gas (LNG), maar 'cryogene opslag' van aardgas introduceert extra kosten en energieverliezen.

Aardgas kan worden toegepast in aangepaste dieselmotoren. De emissies zijn dan lager, het geproduceerde lawaai door de motoren echter hoger. Aardgas kan ook worden gebruikt om waterstof te maken hetgeen een veel schonere brandstof is. Dit levert verbruikt in verbrandingsmotoren echter geen voordeel op met betrekking tot het broeikas-effect, omdat CO₂ in dat geval eerder in de keten geproduceerd wordt. Het voordeel van aardgas ten opzichte van LPG is dat aardgas, zeker in ons land, in grote hoeveelheden aanwezig is. Bovendien is een infrastructuur voor de distributie van aardgas in veel landen aanwezig.

2.3 Verbeterde dieselmotoren

Dieselmotoren zijn zeer geschikt voor zware voertuigen doordat de dieselmotor goede prestaties levert en het verbruik relatief laag is. Binnen het vrachtwagensegment en het bussegment heeft de dieseltechnologie dan ook vrijwel de gehele markt.

Het gebruik van diesel heeft echter ook nadelen. Dieselmotoren veroorzaken relatief veel emissies. Het feit dat drieweg katalysatoren (vanwege de roetvorming) tot nu toe niet toegepast kunnen worden in combinatie met dieselmotoren speelt hierbij een belangrijke rol. Toch hebben motorverbeteringen in het verleden de emissies van dieselmotoren aanzienlijk verlaagd en zal deze daling in de toekomst naar verwachting doorzetten.

Het terugbrengen van de NO_x- en VOS-emissies door dieselmotoren is een belangrijke beleidsdoelstelling en de technische mogelijkheden zijn nog niet uitgeput. Met directe injectie dieselmotoren, de zogenaamde 'intercooler' en door toepassing van NO_x-katalysatoren en Exhaust Gas Recirculation (EGR) kunnen de NO_x-emissies worden teruggedrongen. De algemene verwachting voor de toekomst is dat de uitstoot van CO en VOS significant verminderd kan worden, dat energieverbruik (evenals de uitstoot van CO₂) met 15% verminderd kan worden en dat de NO_x-emissies nog met 50% kunnen worden teruggebracht.

2.4 Hybride voertuigen

Hybride voertuigen combineren een elektrische aandrijving met een andere energiebron. Dit kan een verbrandingsmotor zijn, een gasturbine, een vliegwiel of een brandstofcel. In deze studie verstaan we onder een hybride voertuig een voertuig met als tweede energiebron de dieselmotor.

De emissies van hybride voertuigen liggen lager dan die van een dieselveertuig. Hoeveel lager hangt af de mate waarin gebruik wordt gemaakt van de puur elektrische of gecombineerde diesel elektrische aandrijving. Daarnaast kan met een hybride voertuig het energieverbruik bij stadsritten naar verwachting met 15 à 35% omlaag en kan dus een overeenkomstig percentage aan CO₂-emissies worden vermeden. Tot slot scoort een hybride voertuig goed qua geluidbelasting; de elektrische aandrijving is zeer stil.

Gegevens over hybride voertuigen zijn schaars. Dit hangt wellicht samen met het feit dat fabrikanten veel van hybride voertuigen verwachten en uit concurrentieoverwegingen derhalve spaarzaam zijn met het verstrekken van gegevens.

3. HUIDIG EN TOEKOMSTIG BELEID IN HET VERKEER EN VERVOER

3.1 Inleiding

Sinds 1996 zijn er verschillende nota's gepubliceerd die aandacht besteden aan het nationale milieubeleid op het gebied van verkeer en vervoer. Het nationale milieubeleid voor de periode 1999-2003 op het gebied van wegvervoer, railvervoer en binnenvaart is uitgewerkt in het 'Nationaal milieubeleidsplan 3' (NMP3) [3]. Bronmaatregelen ter bestrijding van emissies door wegverkeer zijn beschreven in de nota 'Voertuigtechniek en brandstoffen' [4]. Voorstellen om het bestaande beleid beschreven in het 'Tweede Structuurschema verkeer en vervoer' (SVV2) te intensiveren en versnellen staan in de nota's 'Samen werken aan bereikbaarheid' (SWAB) [5] en 'Transport in balans' (TIB) [6]. De nota 'Milieu en economie' [7], beschrijft een aantal perspectieven en aandachtsvelden die vooral zijn gericht op het verminderen van de groei van de hoeveelheid voertuigkilometers.

Alternatieve aandrijftechnologieën krijgen over het algemeen weinig aandacht in het nationale beleid omdat verwacht wordt dat ze op korte termijn weinig emissiereductie zullen opleveren ten opzichte van verbeterde benzine- en dieselveertuigen. Er worden in de nota's dus weinig maatregelen gevonden die direct gericht zijn op toepassing van of onderzoek naar alternatieve brandstoffen en aandrijftechnologieën.

De nota's bevatten wel veel maatregelen die indirect gevolgen kunnen hebben op de toepassing van alternatieve brandstoffen en aandrijftechnologieën, zowel in positieve als in negatieve zin. Een voorbeeld van een indirecte maatregel is een emissieregeling. Deze kan er onder andere voor zorgen dat de industrie meer geld besteedt aan onderzoek naar en ontwikkeling van schonere brandstoffen en motoren.

Dit hoofdstuk behandelt de directe en indirecte maatregelen uit bovengenoemde nationale beleidsstukken. Eerst worden de nationale beleidsmaatregelen besproken die een positief effect kunnen hebben op de invoering van brandstofcelvoertuigen, met name bussen en vrachtwagens. Vervolgens worden de maatregelen belicht die de inzet van conventionele voertuigen bevorderen en dus een negatief effect kunnen hebben op de invoering van brandstofcelvoertuigen. Tot slot worden vergelijkbare maatregelen op provinciaal/gemeentelijk niveau bekeken.

3.2 Nationale beleidsmaatregelen met mogelijk positief effect

3.2.1 Regelgeving

Op het gebied van de emissieregeling is Nederland afhankelijk van de EU. Wettelijke grenswaarden voor emissies van NO_x, CO, VOS, deeltjes en geluid worden in Europese richtlijnen vastgelegd. Grenswaarden voor andere emissies en een verscher-

ping van de emissie-eisen kunnen nationaal worden vastgelegd. De beleidsnota 'Voertuigtechniek en brandstoffen' bevat maatregelen die in nationaal verband kunnen worden genomen. Het Ministerie van VROM is verantwoordelijk voor de emissienormstelling.

Hier worden de beleidsmaatregelen en de beoogde resultaten beschreven uit de beleidsnota 'Voertuigtechniek en brandstoffen'. Deze maatregelen zijn een uitwerking van het NMP-2 beleid.

- *Emissienormstelling voor NO_x, VOS, CO en deeltjes voor personenauto's, vrachtauto's, bussen en bestelauto's*

Gestreefd wordt naar een aanscherping van in Europese richtlijnen vastgestelde wettelijke grenswaarden voor emissies van NO_x, VOS, CO en deeltjes. Het beoogde resultaat is een reductie van de parkemissiefactoren van circa 25 tot 70% per voertuigkilometer in 2000, 2005 en 2010 (afhankelijk van EU-emissie eisen).

- *Kwaliteitseisen brandstoffen*

Er wordt aanscherping van de kwaliteitseisen van ongelode benzine en dieselbrandstof nagestreefd. De kwaliteitseisen hebben een vermindering van de NO_x-, VOS-, benzeen-, deeltjes- en PAK-emissies als gevolg. Gestreefd wordt naar lagere parkemissiefactoren per voertuigkilometer variërend van 0,5 tot 30% (afhankelijk van EU-brandstofsificaties).

- *CO₂-reductie van wegvoertuigen*

In 2010 zouden de nieuwe wegvoertuigen circa 20 tot 30% zuiniger moeten zijn (afhankelijk van resultaten in EU-verband).

- *Emissienormstelling geluid*

Er wordt onder andere gestreefd naar het in Europese richtlijnen opnemen van geluidemissie eisen voor banden. De emissienormstelling voor geluid zou moeten resulteren in ca. 4 tot 10 dB(A) stillere nieuwe wegvoertuigen (afhankelijk van EU-emissie eisen).

Naast de bestaande beleidsmaatregelen zal de overheid zich inzetten voor nieuwe regelingen. De overheid zet zich bijvoorbeeld in voor een SELA II-regeling (regeling ter stimulering van de introductie van Schoon En Lawaai Arm vervoer). Deze regeling zorgt voor de versnelde invoering van normen voor de schoonste voertuigen, sneller dan de EU-norm vereist. Verder zet de overheid zich in voor het betrekken van N₂O in het proces van de Europese emissieregelgeving. De overheid start hiertoe in 1998 een onderzoek om inzicht te krijgen in de omvang van de N₂O-emissie door wegvoertuigen. (N₂O-emissies vormen inmiddels onderdeel van het Kyoto protocol.).

3.2.2 Stimulering

Aan de ene kant kan stimulering de vorm hebben van bijdrageregelingen voor bedrijven voor bijvoorbeeld de aanschaf van nieuwe voertuigen. Zo kunnen initiatieven ondersteund worden. Een voorbeeld hiervan is de stimulering van de toepassing van voertuigen die rijden op alternatieve brandstoffen. Aan de ander kant kan stimulering gericht zijn op het verlagen van de variabele kosten van de technologieën die men wenst te stimuleren en het verhogen van de variabele kosten van technologieën die men niet wenst te stimuleren. (Variabele kosten zijn de kosten die men maakt bij het

gebruik van de voertuigen.) Voorbeelden hiervan zijn de variabilisatie- en vergroeningsmaatregelen die onder andere beschreven zijn in de nota Voertuigtechniek en brandstoffen [4].

De variabilisatie- en vergroeningsmaatregelen (per 1-7-1997) houden in:

- verhoging van de accijnstarieven,
- milieugunstige verlaging motorrijtuigenbelasting (MRB), ter compensatie voor de verhoging van de accijnstarieven,
- vrijstelling belasting personenauto's en motorrijwielen (BPM) voor elektrische auto's,
- vrijstelling motorrijtuigenbelasting (MRB) voor bussen op LPG en aardgas.

De variabilisatie- en vergroeningsmaatregelen zijn duidelijk gericht op het terugdringen van het gebruik van de auto en niet zozeer op het bezit ervan. De overheid wil met deze maatregelen onder andere de toepassing van schonere brandstoffen bevorderen. De nieuwste en schoonste LPG-installaties worden bijvoorbeeld gestimuleerd door een extra verlaging van de MRB-tarieven voor personenauto's met deze installaties. Verder zal er nog onderzoek naar aanvullende vergroeningsmogelijkheden plaatsvinden.

Aangezien de MRB voor zware vrachtwagens brandstofonafhankelijk is, is verlaging van de MRB als compensatieregeling voor de verhoogde accijnstarieven niet mogelijk. De compensatie zal in overleg met de bedrijfstak worden vastgesteld.

3.2.3 Onderzoek

De overheid financiert onderzoek op het gebied van innovatieve technologie in de transportsector. De overheid wil zo de ontwikkeling en toepassing van nieuwe technologieën in de transportsector stimuleren en eventuele achterstanden op sommige deelgebieden inhalen. Hiertoe zijn verschillende programma's en projecten opgezet.

De overheid heeft verschillende technologieprogramma's in het leven geroepen die zorgen voor de financiering van technologieontwikkeling. De programma's richten zich op de onderzoeks- en ontwikkelingsfasen van het innovatietraject van kansrijke technische mogelijkheden. NOVEM voert de programma's uit.

- Programma Stil, Schoon en Zuinig in stedelijk gebied (SSZ) is in opdracht van het ministerie van Verkeer en Waterstaat (V&W) opgezet.
- Programma Rationeel Energiegebruik in het Verkeer (REV) is in opdracht van het ministerie van Economische Zaken (EZ) opgezet.
- Programma Ecologie, Economie en Technologie (EET). bevordering onderzoek, ontwikkeling en demonstratie, is in opdracht van het ministeries van Economische Zaken en van Onderwijs, Cultuur en Wetenschappen (OC&W).

Deze programma's richten zich onder andere op alternatieve brandstoffen en alternatieve aandrijvingen, maar onder de voorwaarde dat de technologieën op korte termijn beschikbaar zijn. Met andere woorden als het gaat om alternatieve brandstoffen liggen de prioriteiten bij LPG en CNG, al wordt het gebruik van methanol en waterstof als brandstof wel nader onderzocht. Als het gaat om alternatieve aandrijftechnologieën,

richten de programma's zich voornamelijk op hybride en elektrische voertuigen. Brandstofcelvoertuigen komen nog niet in de regelingen voor maar dat kan in de nabije toekomst veranderen.

Om de stap van demonstratieproject naar marktintroductie te bevorderen hebben de ministeries van VROM, V&W en EZ het Programma Grootschalige Demonstratieprojecten opgezet. Het programma richt zich op het organiseren en financieren van grootschalige demonstratieprojecten op het gebied van technische verbeteringen aan de huidige voertuigen, gasvormige brandstoffen en hybride en elektrische voertuigen.

Verder wordt onderzoek bevorderd naar nieuwe vervoerssystemen. De overheid faciliteert en ondersteunt hiertoe onder andere de samenwerking tussen overheid, wetenschappelijke instellingen en bedrijfsleven als het gaat om de implementatietrajecten van nieuwe vervoerssystemen. Voorbeelden van nieuwe vervoerssystemen zijn:

- nieuwe laadeenheden, zoals opvouwbare containers en stapelbare wissellaadbakken,
- ongebeleid transport, containertransport met behulp van automatische voertuiggeleiding,
- buisleidingentransport voor stedelijke distributie, een ondergronds logistiek systeem voor goederenvervoer.

Tevens wil de overheid een kenniscentrum voor verkeer en vervoer opzetten [7]. Dit kenniscentrum zou de samenwerking tussen publiek en private partijen in de verkeers- en vervoerssector moeten bevorderen, om zo de kennis op het terrein van verkeer en vervoer te bundelen.

3.3 Nationale beleidsmaatregelen met mogelijk negatief effect

De overheid wil de toepassing van gasvormige brandstoffen in stedelijk gebieden bevorderen. Hiertoe worden bestelauto's en bussen op LPG en/of aardgas gestimuleerd, vanwege de vele kilometers die bestelauto's en bussen maken binnen de stedelijke gebieden. Voor bestelauto's wordt een verschuiving gewenst naar benzine en mogelijk LPG of aardgas. Voor distributievoertuigen (voornamelijk lichte vrachtauto's) en inzamelvoertuigen (waaronder vuilniswagens) verkeert de techniek van aardgas en LPG nog in het ontwikkelstadium. Voor distributievoertuigen wil de overheid dan ook grootschalige demonstratieprogramma's opstellen. Voor inzamelvoertuigen wil het kabinet een convenant met de lokale overheden afsluiten. Voor bussen is de techniek beschikbaar en zijn de effecten op stedelijk niveau groot. Voor bussen streeft het kabinet dan ook naar een grootschalige inzet van LPG en/of aardgas. De overheid wil met de busbedrijven de afspraak maken om in 2002 50% van de nieuw aangeschafte bussen op gas te laten rijden.

Het stimuleren van de gasvormige brandstoffen beperkt op de korte termijn de kansen voor brandstofcellen. Echter, de aandacht voor gasvormige brandstoffen impliceert ook aandacht voor alternatieve brandstoffen in het algemeen. Brandstofcellen kunnen op de langere termijn mogelijk profiteren van deze aandacht.

Er bestaan ook maatregelen die het huidig vrachtverkeer faciliteren, waarbij geen onderscheid wordt gemaakt tussen wel of niet milieuvriendelijke voertuigen.

Wegvervoer over de korte afstand en het wegvervoer over de langere afstand zonder alternatief wordt rond de stedelijke gebieden gefaciliteerd met:

- spits- en vrachtautostroken,
- medegebruik busbanen door vrachtverkeer,
- eigen toe- en afritten bedrijfsterreinen en distributiecentra,
- doelgroepstroken.

Verder zal de inrichting van de toeleidende en de ringwegen erop gericht zijn het economisch belangrijk verkeer en het collectief personenvervoer zo goed mogelijk te laten doorstromen in en rond stedelijke gebieden. Ook zal de capaciteitsvergroting op de grote doorgaande routes (corridors) in belangrijke mate worden bestemd voor het vrachtverkeer.

Een laatste voorbeeld van vrachtverkeer faciliterend beleid is het voornemen om de venstertijden te verruimen. Dit zou het vervoer meer spreiden over het etmaal, waardoor de bereikbaarheid van steden verbetert.

3.4 Maatregelen op gemeentelijk niveau

Ook op gemeentelijk niveau worden beslissingen genomen die de inzet van vrachtwagens treffen. Een voorbeeld is de gemeente Amsterdam. Sinds 1 oktober 1996 is het centrum, met uitzondering van de doorgaande wegen, afgesloten voor zwaar vrachtverkeer (zwaarder dan 7,5 ton). Wel gelden er uitzonderingen: het gaat dan vooral om de zogenaamde categorieën 'vies' (bijvoorbeeld afvaltransport of chemisch vervoer), 'vers' (zoals koelwagens, groente, bloemen) en 'vervelend' (zoals heipalen of grote meubels). Ook vrachtwagens die voor meer dan 80% beladen zijn met een lading bestemd voor of afkomstig uit de binnenstad vallen onder de uitzondering. De vrachtwagens die tot de uitzonderingen behoren en dus wel buiten de hoofdwegen in het centrum mogen rijden, moeten tevoren een ontheffing aanvragen.

Per 1 oktober 1998 worden de regels verscherpt. De aanscherping bestaat hierin dat vrachtwagens die ook buiten de hoofdwegen in de binnenstad willen rijden moeten voldoen aan drie eisen: ze moeten voldoen aan de 'Euro2 norm', die een maximaal toegestane emissie betreft, ze mogen niet langer zijn dan ruim negen meter (maximale wielbasis van 5 meter) en de beladingsgraad moet tenminste 80% (gewicht of volume) zijn en in haar geheel bestemd zijn voor of afkomstig uit de binnenstad.

Ook de nationale overheid speelt een rol op gemeentelijk niveau: de rijksoverheid stimuleert de vermindering van het aantal ritten van minder dan 50 km, vooral in stedelijke gebieden. De overheid participeert hiertoe in het Platform Stedelijke Distributie. In het kader van dit programma wordt gewerkt aan vernieuwende stedelijk distributie concepten, dit in overleg met gemeenten, vervoerders, verladers en de ontvangende bedrijven.

3.5 Conclusies

Er zijn weinig beleidsmaatregelen die direct gericht zijn op toepassing of onderzoek naar alternatieve brandstoffen en aandrijftechnologieën. Wel bevatten beleidsnota's veel maatregelen die indirecte gevolgen kunnen hebben op de toepassing van alternatieve brandstoffen en aandrijftechnologieën.

Indirecte maatregelen met positieve gevolgen zijn de voorgenomen aanzienlijke reducties van diverse emissies (NO_x, VOS, CO, deeltjes en CO₂) en geluid door voertuigen, de stimulering van de toepassing van voertuigen die rijden op alternatieve brandstoffen, en het feit dat de overheid diverse onderzoeksprogramma's heeft geïnitieerd die zorgen voor de financiering van technologieontwikkeling in de vervoerssector. Qua alternatieve brandstoffen liggen de prioriteiten bij LPG en CNG, qua alternatieve technologieën bij elektrisch en hybride voertuigen. Voertuigen op brandstofcellen komen in de regelingen niet als afzonderlijke categorie voor. Dit kan in de nabije toekomst veranderen. (In wezen is een voertuig op brandstofcellen echter een elektrisch voertuig.)

Indirecte beleidsmaatregelen met mogelijk negatieve gevolgen voor de brandstofceltechnologie zijn het feit dat de overheid de toepassing van gasvormige brandstoffen als LPG en CNG momenteel nadrukkelijk bevordert en maatregelen die het huidige vrachtverkeer faciliteren. Denk hierbij aan het in gebruik stellen van spits- en vrachtwagenstroken het medegebruik van busbanen door vrachtverkeer vrachtverkeer; in beide situaties komt de dieselmotor (energetisch gezien) optimaal tot zijn recht. Deze negatieve gevolgen gelden overigens met name voor de korte termijn. Op de lange termijn kan de brandstofceltechnologie mogelijk profiteren van de aandacht voor alternatieve brandstoffen hetgeen in wezen ook aan het stimuleren van brandstoffen als LPG en CNG ten grondslag ligt.

4. BRANDSTOFCELAANDRIJVINGEN EN CONCURRERENDE TECHNOLOGIEËN

4.1 Inleiding

De brandstofceltechnologie is heden ten dage nog duurder dan zijn concurrerende technologieën. Naar verwachting zullen deze kosten in de toekomst dalen. Tegelijkertijd zullen de kosten van conventionele technologieën in de toekomst veelal toenemen. Immers, om aan de toekomstige emissiewetgeving te voldoen dienen extra investeringen te worden gepleegd. Toch wordt verwacht dat de brandstofceltechnologie de komende 10 jaar duurder blijft dan de concurrerende aandrijftechnologieën.

De brandstofceltechnologie heeft echter milieuvoordelen. Het toepassen van deze technologie betekent dat er geen emissies plaatsvinden in dichtbevolkte gebieden. Emissies ontstaan slechts in het voortraject, dat wil zeggen tijdens de brandstofproductie. Dergelijke emissies zijn beter controleerbaar dan de diffuse emissies ten gevolge van het rijden van vervoermiddelen. Bovendien is het totaal aan emissies ten gevolge van de productie van brandstof en het rijden van de voertuigen in het geval van de brandstofceltechnologie vele malen lager dan in het geval van de dieseltechnologie. Dit voordeel geldt ook ten opzichte van de CNG-, LPG en benzinettechnologie.

Uitgangspunt voor de integrale analyse is dat moet worden voldaan aan de toekomstige NO_x-normen. Daar het voldoen aan deze emissienormen als meest lastig ervaren wordt is aangenomen dat indien aan de NO_x-normen wordt voldaan, de overige emissies ook onder de norm zullen blijven. Evenzo is aangenomen, dat voertuigen die middels extra investeringen voldoen aan de NO_x-emissies, eveneens voldoen aan de toekomstige normen voor de overige emissies.

In dit hoofdstuk wordt de verhouding tussen de kosten en milieuvoordelen van de brandstofceltechnologie met die van diverse concurrerende technologieën vergeleken. De vervoersegmenten waarbinnen de inzet van de brandstofceltechnologie wordt bestudeerd zijn 'het goederenvervoer per bestelauto', 'het goederenvervoer per vrachtwagen' en 'het collectief personenvervoer per bus'. Concurrerende aandrijftechnologieën die worden beschouwd zijn verbeterde dieselmotoren, gasmotoren en hybride aandrijfsystemen. Tabel 4.1 vat de onderzochte vervoersegmenten en aandrijftechnologieën samen.

De milieutechnische versus economische vergelijking vindt plaats voor een tweetal jaren, te weten het jaar 2003 en het jaar 2008, respectievelijk 5 en 10 jaar vanaf nu. In de milieutechnische versus economische analyse worden de diverse aandrijftechnologieën met de verbeterde dieseltechnologie vergeleken; de meerkosten van de alternatieve aandrijftechnologieën worden afgezet tegen de extra afname van de emissies ten gevolge van de inzet van de alternatieve aandrijftechnologieën. De reductiekosten worden vergeleken met de investeringen die moeten worden gedaan om dieselvoertuigen aan de toekomstige Euro3- en Euro4-normen te laten voldoen. Aldus

wordt inzicht verkregen in de kosten waartegen emissiereducties bereikt kunnen worden en met welke technologie.

Tabel 4.1 *Verschillende aandrijftechnologieën en vervoersegmenten*

	Bussen	Bestelauto's	Vrachtwagens
Verbeterde diesel ^{*)}	×	×	×
LPG	×	×	×
CNG	×		
Brandstofcellen	×	×	×
Hybride	×		

^{*)} Referentietechnologie

Leeswijzer

Paragraaf 4.2 gaat in op de milieutechnische beoordeling, paragraaf 4.3 vervolgens op de economische beoordeling. De belangrijkste aannames die aan de berekeningen die in dit hoofdstuk gedaan worden ten grondslag liggen worden in 4.2 en 4.3 besproken. In paragraaf 4.4 worden vervolgens de meest relevante aannames met betrekking tot voertuigen aangedreven met brandstofcellen op een rijtje gezet. In paragraaf 4.5 tot slot vindt de integrale beoordeling plaats op basis van zowel de milieutechnische als de economische aspecten.

4.2 Milieutechnische beoordeling

De emissiekaracteristieken van de diverse voertuigtechnologieën worden beschreven in grammen per voertuigkilometer. Vervolgens worden de emissiekaracteristieken vergeleken voor de jaren 2003 en 2008.

Voor voertuigen op brandstofcellen worden de emissies afgeleid uit [9]. Voertuigen op brandstofcellen zijn emissievrij. De emissies waar gewag van gemaakt wordt ontstaan bij de installaties waar het aangevoerde aardgas wordt omgezet in waterstof en de voertuigen waterstof tanken.

De verwachte emissiekaracteristieken van LPG, CNG en dieselvoertuigen die in de jaren 2003 en 2008 beschikbaar komen zijn uitgewerkt in een tweetal scenario's:

- In het Euro-Scenario voldoen de emissies van de zware dieselvoertuigen in 2003 en 2008 aan de Euronormen 3 en 4. (Officieel worden de Euro 3 en Euro 4 normen respectievelijk in het jaar 2000 en 2005 van kracht.) De Euronormen worden weergegeven in Tabel 4.2. Voor voertuigen op LPG en CNG wordt aangenomen dat ze voldoen aan de normen die op dat moment voor vergelijkbare benzinevoertuigen gelden.
- In het RIVM/DAF-Scenario komen de voertuigemissies:
 - Voor dieselvoertuigen overeen met de emissies zoals het RIVM die in zijn modellen gebruikt [8] (deze modellen worden ingezet ten behoeve van de nationale milieuverkenningen).
 - Van zware LPG en CNG voertuigen overeen met die zoals door DAF worden aangenomen.

De emissies in het Euro-scenario zijn emissies overeenkomstig de Euro-wetgeving. De emissies in het RIVM/DAF-scenario weerspiegelen de werkelijke emissies. De werkelijke emissies zijn iets hoger dan de Euronormen door onder meer een slechte afstelling en achterstallig onderhoud van de voertuigen.

De emissiekenmerken van de voertuigtechnologieën die in deze studie worden beschouwd worden weergegeven in bijlage B.

Tabel 4.2 *Europese emissiewetgeving voor zware dieselveertuigen [8]*

	Euro3, 2000 [g/kWh]	Euro4, 2005 [g/kWh]
CO	2,8	1,0
NO _x	4,9	2,5
VOS	0,8	0,4
Deeltjes >85kW	0,11	0,08
Deeltjes <85kW	0,11	0,10

Toelichting Tabel 4.2: het betreft hier voornemens (Euro3) en grove indicaties van de geplande emissienormering (Euro4).

Emissiekenmerken worden in de literatuur uitgedrukt in grammen per voertuigkilometer of, in het geval van dieselveertuigen, in grammen per kWh. De laatste kentallen worden op basis van aannames voor het brandstofverbruik, de energie-inhoud van de brandstof en een gemiddeld motorrendement omgerekend naar grammen per voertuigkilometer. Daar waar in het vervolg van dit rapport een omrekening plaatsvindt worden de aannames, met betrekking tot de energie-inhoud en dergelijke, vermeld.

4.3 Economische beoordeling

Om de kosten van de voertuigtechnologieën met elkaar te kunnen vergelijken worden de voertuigkosten uitgedrukt in de kosten per voertuigkilometer (Vkm). De kosten per voertuigkilometer worden berekend op basis van de jaarlijkse kosten en het (gemiddeld) jaarkilometrage. De jaarlijkse kosten bestaan uit jaarlijkse variabele en vaste kosten. Vaste kosten zijn bijvoorbeeld de afschrijvingskosten en de motorrijtuigenbelasting (MRB). Variabele kosten zijn bijvoorbeeld de onderhoudskosten en brandstofkosten. Zij zijn afhankelijk van het jaarkilometrage. Het gemiddeld jaarkilometrage van de diverse bedrijfsvoertuigen hangt wederom af het type voertuig en het type bedrijfsvoering. Zo heeft een dieselbus een hoger verbruik dan een dieselbestelauto en verbruikt een dieselbus in het stadsverkeer meer energie dan het geval is buiten de bebouwde kom.

In Figuur 1 wordt de wijze waarop de voertuigkilometerkosten worden berekend schematisch weergegeven. Bovendien laat de figuur zien uit welke kostenposten de jaarlijkse kosten zijn opgebouwd. De kostenposten en overige noodzakelijke gegevens om de voertuigkilometerkosten van de voertuigtechnologieën te berekenen worden weergegeven in bijlage A.

De voertuigkilometerkosten worden berekend voor de jaren 2003 en 2008. Voor de diesel- en LPG-technologie worden deze kosten afgeleid van de kosten voor het jaar 1998. De kosten voor de jaren 2003 en 2008 worden berekend uitgaande van:

- Een algemene prijsstijging.
- Investeringskosten die noodzakelijk zijn om het voertuig aan de toekomstige emissie-eisen te laten voldoen.

De algemene prijsstijging voor de periode 1998-2008 wordt verondersteld gelijk te zijn aan de gemiddelde prijsstijging in de verkeers- en vervoerbranche. Deze is 1,5% per jaar in de periode 1990-1996 [10].

Investeringskosten die moeten worden gedaan om aan de toekomstige emissiewetgeving te voldoen zijn afgeleid uit [11]. Reducties in de NO_x-emissies en aërosolen emissies zijn technisch moeilijk te realiseren. Daarom wordt aangenomen dat voertuigen die middels extra investeringen voldoen aan de NO_x-emissies eveneens voldoen aan de toekomstige normen voor de overige emissies. Noodzakelijke investeringen om dieselvoertuigen te laten voldoen aan de toekomstige emissiewetgeving kunnen, deels door extrapolatie, deels rechtstreeks uit [11] worden afgeleid. Noodzakelijke investeringen voor LPG-voertuigen worden afgeleid uit de noodzakelijke investeringskosten voor benzinevoertuigen. LPG-voertuigen moeten namelijk aan de normen voor benzinevoertuigen voldoen. Voor zowel LPG als benzinevoertuigen worden de noodzakelijke emissiedalingen gerealiseerd door aanpassingen aan de katalysator.

Kosten voor brandstofcellen in mobiele toepassingen worden afgeleid uit [9]. In deze studie worden de kosten voor brandstofcellen in bussen beschreven. De kosten voor vergelijkbare systemen in vrachtwagens en bestelauto's zijn afgeleid uit [9] op basis van een reeks aannames. Deze aannames worden in paragraaf 4.4 op een rij gezet. De verwachte investeringskosten voor brandstofcellen op een termijn van 5 à 10 jaar zijn enigszins onzeker; voor het jaar 2003 en 2008 worden gelijke investeringskosten verondersteld.

Onderhoudskosten

De vervangingskosten van stacks worden opgevoerd als jaarlijkse vaste onderhoudskosten. In overeenstemming met de aanname dat stackkosten in een bestelauto en bus zich verhouden als de motorvermogens, worden ook de vervangingskosten van stacks in bestelbus en bus verondersteld zich te verhouden als de motorvermogens, dat wil zeggen als 1:4.

Brandstofverbruik

Het H₂-verbruik van brandstofcelbussen kan worden afgeleid uit [9]. Vervolgens wordt verondersteld dat de verhouding van het brandstofverbruik 'bus op diesel: bus op H₂' gelijk is aan de verhouding van het brandstofverbruik 'bestelauto op diesel: bestelauto op H₂'. Impliciet wordt dan verondersteld dat het verschil in prestatie tussen diesel en waterstof voor bussen en bestelauto's gelijk is.

Brandstofkosten

De kosten van H₂ kunnen worden afgeleid uit [9, 12] en bedragen f 8,73/kg.

4.4.2 Vrachtwagens

LPG/CNG-voertuigen

Meerkosten investeringen LPG/CNG-voertuigen

De meerkosten van LPG- en CNG-voertuigen zijn aangeleverd door DAF (zie bijlage A).

Onderhoudskosten

De verhouding tussen de onderhoudskosten van LPG en CNG vrachtwagens wordt verondersteld gelijk te zijn aan de verhouding tussen de onderhoudskosten van diesel en LPG en CNG bussen.

Brandstofcellsystemen

Meerkosten investeringen brandstofcellsystemen

De meerkosten van brandstofcelvrachtwagens ten opzichte van dieselvrachtwagens zijn gesplitst in de kosten van de stacks en de overige kosten. Vervolgens worden de meerkosten van de stacks in vrachtwagens afgeleid van het verschil tussen de motorvermogens in bus en vrachtwagen. Deze motorvermogens verhouden zich als 1:1; voor de meerkosten van stacks wordt dezelfde verhouding aangenomen.

Onderhoudskosten

De vervangingskosten van stacks worden opgevoerd als jaarlijkse vaste onderhoudskosten. In overeenstemming met de aanname dat stackkosten in een vrachtwagen en bus zich verhouden als de motorvermogens, worden ook de vervangingskosten van stacks in bus en vrachtwagen verondersteld zich te verhouden als de motorvermogens, dat wil zeggen als 1:1.

Brandstofverbruik

Het H₂-verbruik van brandstofcelbussen kan worden afgeleid uit [9]. Vervolgens wordt aangenomen dat het brandstofverbruik van een vrachtwagen op H₂ zich verhoudt tot het brandstofverbruik van een vrachtwagen op diesel als het brandstofverbruik van

een bus op H₂ ten opzichte van een bus op diesel. Deze aanname is echter niet vanzelfsprekend. Immers, een vrachtwagen legt vergeleken met een bus naar verhouding veel meer kilometers buiten de stad af. Buiten de stad komen de prestaties van een dieselmotor het meest tot zijn recht. Daar voor voertuigen op brandstofcellen en H₂ een dergelijk verschil voor binnen en buiten de bebouwde kom niet direct aan de orde is, is het zeer wel mogelijk dat de verhouding tussen de prestatie van een bus op diesel en een bus op H₂ verschilt van de verhouding tussen het verschil op diesel en een vrachtwagen op H₂. Deze aanname verdient derhalve aandacht in een gevoeligheidsanalyse.

Brandstofkosten

De kosten van H₂ kunnen worden afgeleid uit [9, 12] en bedragen f 8,73/kg.

4.4.3 Bussen

Brandstofsystemen

Meerkosten investeringskosten brandstofsystemen

De meerkosten van brandstofcelbussen ten opzichte van dieselbussen zijn rechtstreeks afgeleid uit [9].

Onderhoudskosten

De vervangingskosten van stacks zijn rechtstreeks af te leiden uit [9]. Deze vervangingskosten worden opgevoerd als jaarlijkse vaste onderhoudskosten.

Brandstofverbruik

Het H₂-verbruik van brandstofcelbussen kan worden afgeleid uit [9].

Brandstofkosten

De kosten van H₂ kunnen worden afgeleid uit [9, 12] en bedragen f 8,73/kg.

4.5 Integrale beoordeling

4.5.1 Opzet basisanalyses en gevoeligheidsanalyses

In de integrale beoordeling worden de milieutechnische en economische aspecten van de aandrijftechnologieën gecombineerd.

De vervoersegmenten waar analyses voor worden verricht zijn:

- het goederenvervoer per bestelauto,
- het goederenvervoer per vrachtwagen,
- het collectief personenvervoer per bus.

De aandrijftechnologieën die worden beschouwd zijn:

- verbrandingsmotoren (met als brandstof diesel, LPG of CNG),
- brandstofcellen (met als brandstof waterstof),
- hybride aandrijfsystemen met als conventionele brandstof diesel (in het geval van de bus).

De vervoersegmenten en de aandrijftechnologieën werden reeds getoond in Tabel 4.1.

Integrale beoordelingen zijn uitgevoerd voor het jaar 2003 en 2008. Bij de beoordeling van de alternatieven LPG, CNG en brandstofcellen wordt ervan uitgegaan dat ook de dieseltechnologie zich de komende 10 jaar ontwikkelt. De alternatieve technologieën worden vergeleken met de verbeterde dieseltechnologie. De emissies van zowel de verbeterde dieseltechnologie als de alternatieve technologieën worden beschreven in het RIVM/DAF-scenario en het Euro-scenario. De emissies van brandstofcellensystemen zijn afgeleid uit [9].

Diverse berekeningen zijn uitgevoerd

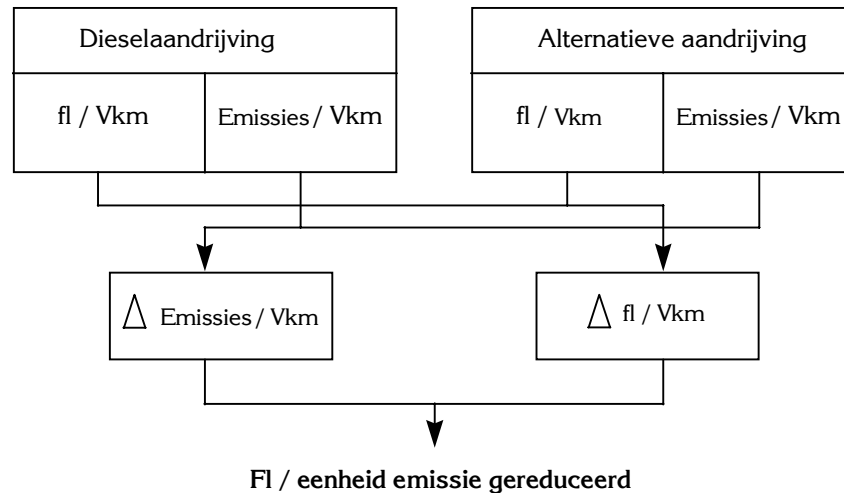
1. De brandstofceltechnologie en verbrandingsmotoren op LPG worden vergeleken met de verbeterde dieseltechnologie. De meerkosten van de alternatieve technologieën worden afgezet tegen de extra afname van de NO_x-emissies ten gevolge van de inzet van deze technologie. De wijze waarop de meerkosten per gram gereduceerde NO_x-emissie worden berekend wordt schematisch weergegeven in Figuur 4.2.

Resultaat van de analyses zijn de kosten van de LPG en brandstofceltechnologie uitgedrukt in guldens per (extra) gram gereduceerde emissie (ten opzichte van verbeterde dieseltechnologie). Deze reductiekosten worden vergeleken met investeringen die in de perioden 1998-2003 en 2003-2008 worden gedaan om de dieselvoertuigen te laten voldoen aan de Euronormen, waarvan wordt verondersteld dat ze in de jaren 2003 (Euro3) en 2008 (Euro4) worden doorgevoerd. Aldus wordt inzicht verkregen in de kosten waartegen emissiereducties bereikt kunnen worden en met welke technologie.

2. De jaarlijkse kosten van voertuigen met brandstofcellensystemen, van hybride bussen en van voertuigen met verbrandingsmotoren met als brandstof diesel, LPG en CNG worden tegen elkaar afgezet.

Berekeningen zijn uitgevoerd voor de twee scenario's, het scenario RIVM/DAF en het scenario Euro, en voor de jaren 2003 en 2008. Dit levert een drietal basisanalyses op: zie Tabel 4.3. (Voor het RIVM/DAF-scenario kan wegens datagebrek geen analyse worden uitgevoerd voor 2008). In deze basisanalyses is met betrekking tot een aantal parameters met een onzekere waarde, bijvoorbeeld de hoogte van de wegenbelasting of de brandstofprijzen, gerekend met de meest waarschijnlijke variant.

Vervolgens is in een aantal gevoeligheidsanalyses de gevoeligheid voor de waarde van deze parameters onderzocht. De parameters waarvoor meer dan 1 variant zijn doorgeerekend zijn weergegeven in Tabel 4.3. Tevens is van deze parameter aangegeven welke variant is toegepast in de basisberekeningen 'EURO 2003', 'RIVM/DAF 2003' en 'RIVM/DAF 2008'.



Figuur 4.2 *De kosten van alternatieve aandrijfvormen per (extra) gram gereduceerde emissie (ten opzichte van verbeterde dieseltechnologie)*

Tot slot is een aanvullende analyse uitgevoerd waarin de kansen van de brandstofcel voor mobiele toepassingen nader worden geanalyseerd. In de brandstofcel analyse is de waarde van alle gevoeligheidsparameters (zie Tabel 4.3) dusdanig dat deze de introductie van brandstofcelsystemen begunstigt.

De analyses in paragraaf 4.5.2 zijn gestoeld op bovenstaande berekeningen. Vervolgens worden in paragraaf 4.5.3 analyses besproken waarin de aannames betreffende de kosten voor brandstofcelsystemen zoals besproken in 4.4 zijn losgelaten. Uitgangspunt voor de berekeningen in 4.5.3. zijn de kosten van de NO_x-reducties op basis van de inzet van voertuigen op LPG. Vervolgens worden de toegestane kosten voor de waterstof en de brandstofcelsystemen bepaald wil NO_x-reductie door de inzet van voertuigen op brandstofcelsystemen even kosteneffectief zijn als door de inzet van voertuigen op LPG.

4.5.2 Resultaten basisanalyses en gevoeligheidsanalyses

De resultaten van het drietal basis scenario's zijn weergegeven in de Tabellen 4.4 tot en met 4.6 en Figuur 4.3. De resultaten van de gevoeligheidsanalyses en de aanvullende analyse zijn opgenomen in bijlagen C en D. In deze paragraaf wordt alleen ingegaan op de interpretatie van deze analyses.

Tabel 4.3 *Overzicht parameterwaarden in de diverse analyses*

Parameterwaarde	Brandstof- prijs	Wegen- belasting	Kosten Infra- Structuur	Disconto voet	H ₂ - verbruik VW
Basisanalyses:					
Basis RIVM/DAF 2003	laag	hoog	Laag	Laag	laag
Basis EURO 2003	“	“	“	“	“
Basis RIVM/DAF 2008	“	“	“	“	“
Gevoeligheidsanalyses		Diverse hoog/laag variaties			
Aanvullende analyse:					
Brandstofcelanalyse	hoog	hoog	Hoog	Laag	laag

Toelichting Tabel 4.3:

De waarden van de parameters ‘kosten brandstofcel’ (BC), ‘brandstofprijs’, ‘wegenbelasting’, ‘de kosten van de infrastructuur’, ‘discontovoet’ en ‘H₂-verbruik van de vrachtwagen’ (VW) zijn onzeker. Derhalve worden berekeningen uitgevoerd voor hoge en lage waarden voor deze parameters. In de basisanalyses is uitgegaan van een ‘meest waarschijnlijke waarde’. Hieronder worden de diverse parameter(waarden) kort bediscussieerd.

Brandstofprijs

Voor waterstof en CNG wordt één prijs gehanteerd. Voor diesel wordt gerekend met de varianten ‘laag’ en ‘hoog’.

- Variant ‘Laag’: gaat uit van een afspraakprijs voor diesel; wagenparkbeheerders kunnen vaak afdingen op de prijs van brandstof.
- Variant ‘Hoog’ gaat uit van de prijs aan de pomp.

Wegenbelasting

- Variant ‘Laag’ gaat uit van het feit dat alle milieuvriendelijkere voertuigen zijn vrijgesteld van wegenbelasting.
- Variant ‘Hoog’ gaat uit van de huidige situatie, sommige milieuvriendelijkere voertuigen zijn nu al vrijgesteld van wegenbelasting (zoals de bus op gas), andere nog niet (bestelauto op gas).

Infrastructuur

- Variant ‘Laag’ gaat uit van gemiddelde infrastructuurkosten voor de CNG en LPG bussen berekend op basis van een wagenpark van 60 bussen, de kosten per bus zijn dus laag.
- Variant ‘Hoog’ gaat uit van gemiddelde infrastructuurkosten voor de CNG en LPG bussen berekend op basis van een wagenpark van 25 bussen, de kosten per bus zijn dus hoog.

Discontovoet

- Variant ‘Laag’ gaat uit van een discontovoet van 5%.
- Variant ‘Hoog’ gaat uit van een discontovoet van 7%.

*Brandstofverbruik vrachtwagen (VW) met brandstofcellen*Variant 'Laag': 6,25 kg H₂/100 kmVariant 'Hoog': 12,50 kg H₂/100 km

Het H₂-verbruik van bussen kan worden afgeleid uit [9]. Zoals opgemerkt in 4.4.2 kan het H₂-verbruik van vrachtwagens verschillen van het dat van bussen. Variant 'Laag' gaat uit van een gelijk verbruik door vrachtwagens als door bussen. Variant 'Hoog' gaat uit van een 2 maal zo hoog brandstofverbruik door vrachtwagens.

In de eerste kolom van de Tabellen 4.4 en 4.5 worden de kosten weergegeven die in de periode 1998-2003 worden gedaan om de dieselveertuigen in 2003 aan de Euronorm te laten voldoen. In de eerste kolom van de Tabel 4.6 worden de kosten weergegeven die in de periode 1998-2008 worden gedaan om de dieselveertuigen in 2008 aan de Euronorm te laten voldoen. De tweede en derde kolom van Tabel 4.4, 4.5 en 4.6 geven de kosten van extra reducties die in 2003 en 2008 kunnen worden bereikt door de inzet van voertuigen op LPG of voertuigen op brandstofcellen. Tabel 4.4 toont de kosten volgens het RIVM/DAF-scenario in 2003, Tabel 4.5 die volgens het Euro-scenario in 2003. Tabel 4.6 vervolgens toont voor het Euro-scenario in het jaar 2008.

Opvallend lijkt in eerste instantie dat in 2008 de kosten per gereduceerde eenheid NO_x-emissie hoger liggen dan in 2003 (vergelijk Tabel 4.4 en 4.5). Dit is echter niet vreemd als men bedenkt dat de weergegeven kosten meerkosten zijn ten opzichte van de dieseltechnologie én dat de absolute emissies ook bij dieseltechnologie in 2008 behoorlijk laag liggen.

Belangrijker om op te merken is dat de kosten voor het reduceren van NO_x-emissies door de inzet van brandstofcelssystemen in vrachtwagens of bussen, in 2008 een factor 3 hoger liggen dan de kosten per gereduceerde eenheid emissie om te voldoen aan de Euro4 normen met een verbeterde verbrandingsmotor op diesel. En dat terwijl in 2003 de brandstofceltechnologie nog een factor 13 duurder is dan de dieseltechnologie. Indien het op termijn (>2008) wenselijk is dat de NO_x-emissies nog verder gereduceerd worden is het zeer wel mogelijk dat dit gebeurt door de inzet van brandstofceltechnologie. De reductiekosten op basis van brandstofceltechnologie zijn tegen die tijd behoorlijk gedaald. De emissienormstelling zal zich derhalve mogelijk richten op emissies die haalbaar zijn met voertuigen op brandstofcelssystemen en op met hybride voertuigen haalbare emissies. En met LPG en CNG voertuigen kunnen vergelijkbare emissiereducties niet worden gerealiseerd.

Voor bestelauto's wordt een dergelijk sterke afname van het verschil tussen de verbeterde dieseltechnologie en de brandstofcel bij overgang van het jaar 2003 naar 2008 niet waargenomen. De reductiekosten op basis van brandstofcelssystemen zijn in 2008 nog steeds een factor 10 hoger dan die gemaakt worden om Euro4 te behalen. De kansen voor brandstofcelssystemen zijn binnen het vrachtwagen- en bussegment derhalve groter.

Opvallend is ook dat de kosten per gereduceerde emissie in het geval van het Euro-scenario in alle gevallen hoger liggen dan in het geval van het RIVM/DAF-scenario (vergelijk Tabel 4.3 en 4.4). Dit wordt veroorzaakt door het feit dat de werkelijke uit-

stoot van de dieselveertuigen (door onder meer slechte afstelling en achterstallig onderhoud) hoger ligt dan de Euronormen. En het is deze uitstoot die wordt weergegeven in het RIVM/DAF-scenario. In het RIVM/DAF-scenario worden met de inzet van LPG of brandstofcellen derhalve meer emissies vermeden dan in het Euro3/Euro4 scenario. De kosten per gereduceerde eenheid emissie liggen in het RIVM/DAF-scenario derhalve lager.

Tabel 4.4 *Kosten [f] per gram gereduceerde NO_x-emissie, basis DAF/RIVM 2003*

	Emissie-reductiekosten		Meerkosten per extra gram	
	1998-2003		Gereduceerde NO _x -emissie, 2003	
	Verbeterde diesel		Brandstofcel	LPG
Bestelauto	0,18		1,21	0,09
Vrachtwagen	0,03		0,32	0,00
Bus	0,02		0,17	-0,01

Tabel 4.5 *Kosten [f] per gram gereduceerd NO_x-emissie, basis Euro 2003*

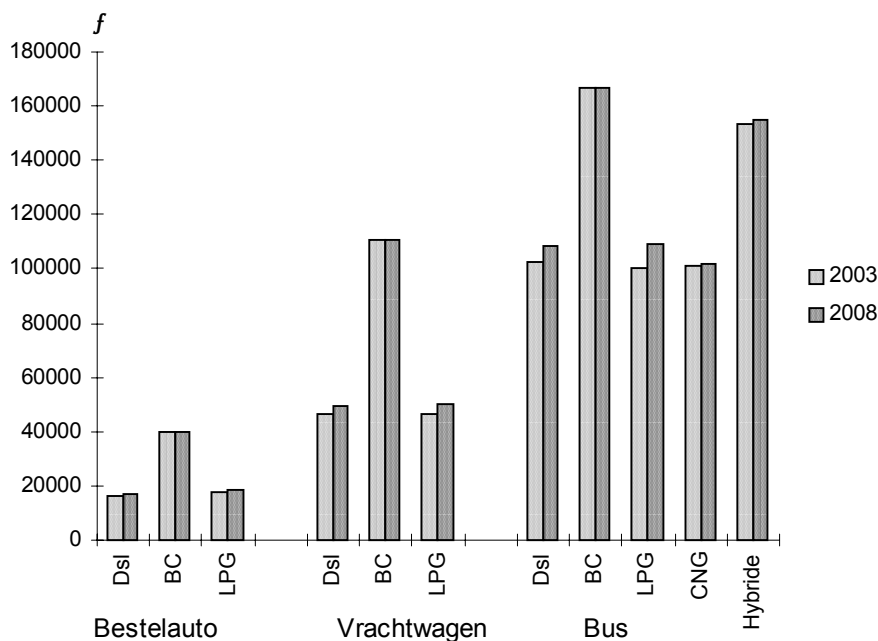
	Emissie-reductiekosten		Meerkosten per extra gram	
	1998-2003		Gereduceerd NO _x -emissie, 2003	
	Verbeterde diesel		Brandstofcel	LPG
Bestelauto	0,18		1,79	0,14
Vrachtwagen	0,03		0,40	0,00
Bus	0,02		0,26	-0,01

Tabel 4.6 *Kosten [f] per gram gereduceerde NO_x-emissie, basis Euro 2008*

	Emissie-reductiekosten		Meerkosten per extra gram	
	1998-2008		Gereduceerde NO _x -emissie, 2008	
	Verbeterde diesel		Brandstofcel	LPG
Bestelauto	0,26		2,25	0,3
Vrachtwagen	0,15		0,44	-0,02
Bus	0,09		0,30	-0,02

Voor alle scenario's geldt dat de reductiekosten in het geval van de introductie van LPG aanzienlijk lager zijn dan in het geval van de introductie van brandstofcellen (zie Tabel 4.4 t/m 4.6). Echter, de totale emissies per voertuigkilometer zijn in het geval van de brandstofcelsystemen veel lager. Bij hoge emissiereductiepercentages kunnen brandstofcelsystemen derhalve een belangrijke bijdrage leveren. Daar alleen met de inzet van elektrische of hybride voertuigen dezelfde effecten kunnen worden bereikt is het interessant de kostenontwikkeling van brandstofcelvoertuigen en hybride/elektrische voertuigen met elkaar te vergelijken.

Uit Figuur 4.3 blijkt dat hybride bussen in de toekomst naar verwachting beschikbaar komen tegen jaarlijkse kosten die vergelijkbaar zijn met de jaarlijkse kosten van brandstofcelbussen. Binnen het vervoersegment bussen liggen dus zeker kansen voor de brandstofcel. Figuur 4.3 laat verder zien dat de jaarlijkse kosten voor bestelbussen en vrachtwagens op brandstofcellen ongeveer een factor 2 hoger liggen dan die van voertuigen met een verbrandingsmotor op diesel of op gas (LPG of CNG) terwijl in het geval van de bus deze jaarlijkse kosten een factor 1,5 verschillen.



Figuur 4.3 Jaarlijkse kosten van diverse voertuigen.

Gevoeligheidsanalyses en aanvullende analyse

Bovenstaande conclusies veranderen niet op basis van de gevoeligheidsanalyses. En ook niet op basis van de brandstofcelanalyse. De kosten per gereduceerde eenheid emissie dalen in deze laatste analyse echter wel. De grootste daling in reductiekosten wordt aangetroffen in het bussegment in het jaar 2008; de kosten per gereduceerde gram NO_x dalen van 30 cent naar 25 cent (zie bijlage C).

4.5.3 Noodzakelijke kostenreducties

NO_x -emissiereducties kunnen worden bereikt door de introductie van voertuigen op brandstofcellen maar ook door de inzet van de brandstof LPG of CNG in plaats van diesel. Uit de basisanalyses die zijn uitgevoerd in 4.5.2 bleek dat het reduceren van NO_x op basis van voertuigen op LPG goedkoper is dan op basis van de voertuigen op brandstofcellen. De reductiekosten per eenheid gereduceerde emissie voor voertuigen op LPG vormen het startpunt voor de analyses die hier worden besproken. In deze analyses wordt gezocht naar een combinatie van investeringskosten en brandstofkosten voor het brandstofcelvoertuig die leiden tot dezelfde reductiekosten per gram gereduceerde emissie als het geval is voor LPG-voertuigen. Bij gelijke reductiekosten zijn brandstofcelvoertuigen uit maatschappelijk oogpunt concurrerend met LPG-voertuigen.

Willen voertuigen op brandstofcellen kunnen concurreren met voertuigen op LPG dan is het een noodzakelijke voorwaarde dat de brandstofcelsysteemkosten dalen. Stel nu dat de investeringen voor voertuigen met een dieselmotor en voertuigen op brandstof-

cellen gelijk zijn. Dan blijkt dat in het vrachtwagensegment de grootste brandstofkostendaling nodig is om tot gelijke kostenreducties per gereduceerde emissie te komen als voor LPG-voertuigen. De analyses in deze paragraaf nemen daarom als uitgangspunt dat:

- Brandstofcelsystemen voor vrachtwagens even duur in aanschaf worden als verbrandingsmotoren op diesel.

Vervolgens wordt voor het vrachtwagensegment:

- De brandstofprijs vastgesteld waarmee de kosten per gereduceerde emissie op basis van brandstofcelsystemen gelijk zijn aan de kosten per gereduceerde emissie voor voertuigen op LPG.

Tot slot worden, uitgaande van de berekende brandstofprijzen:

- Voor het bestelauto- en bussegment de investeringskosten vastgesteld van de brandstofcelsystemen die leiden tot gelijke kostenreducties per gereduceerde emissie als voor LPG-voertuigen.

Resultaten van de analyses waarin gezocht wordt naar de toegestane prijzen voor de brandstof en de brandstofcelsystemen staan weergegeven in de figuren 4.4 en 4.5.

Figuur 4.4 laat zien dat, uitgaande van gelijke investeringskosten voor vrachtwagens op brandstofcellen of op LPG:

- De brandstofkosten in 2003 gedaald moeten zijn naar f 1,00/kg; dit komt ten opzichte van de basisanalyses, waar de brandstofkosten f 8,73/kg zijn, neer op een kostendaling van f 1,55/jaar.

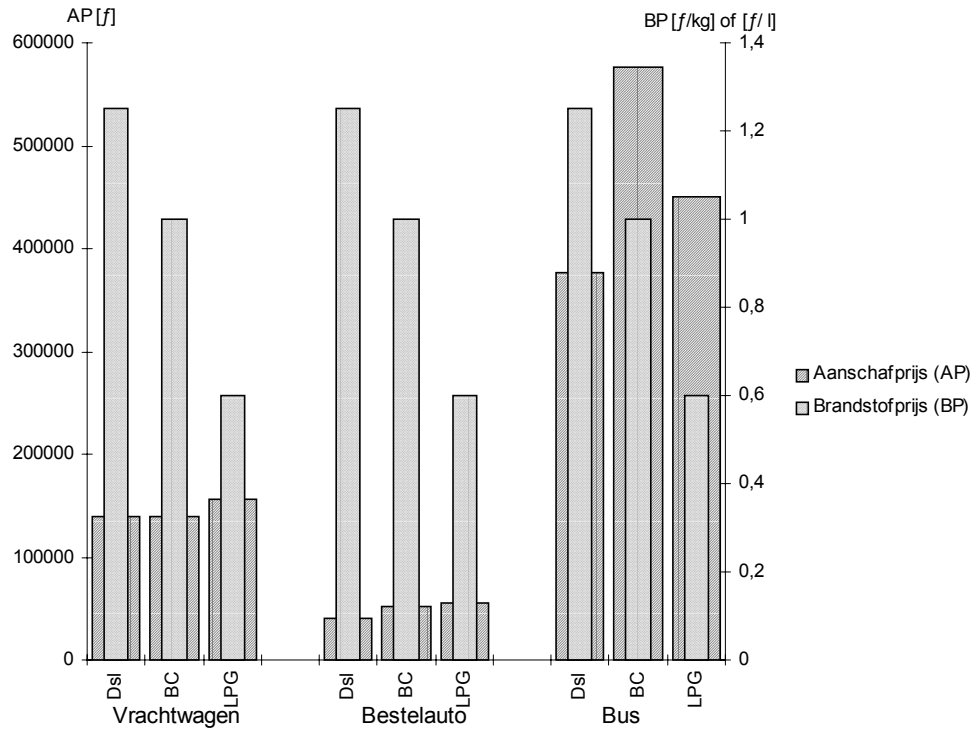
Figuur 4.5 toont de resultaten voor een vergelijkbare analyse voor 2008. De figuur laat zien dat:

- De brandstofkosten in 2008 gedaald moeten zijn naar f 4,50/kg; dit komt ten opzichte van de basisanalyses neer op met een daling van f 0,42/jaar. Een dergelijke daling lijkt niet onrealistisch. Volgens [23] zijn diverse productiemethoden beschikbaar waarmee een beduidend lagere productieprijzen dan f 4,50 kan worden gerealiseerd (zie Tabel 7 in bijlage A).

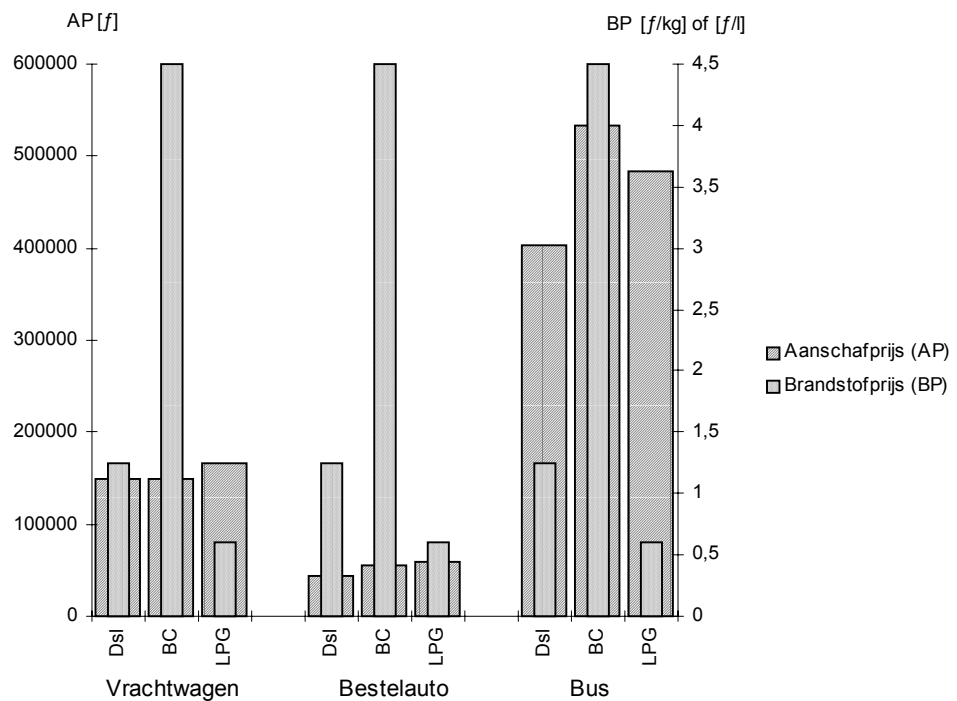
Figuur 4.5 toont bovendien dat uitgaande van een waterstofprijs van f 4,50/kg:

- Brandstofcelsystemen in de bestelautosector goedkoper in aanschaf moeten zijn dan de LPG-aandrijftechnologie.
- Brandstofcelsystemen in de bussensector duurder in aanschaf kunnen zijn dan de LPG-aandrijftechnologie.
- De meerkosten van de brandstofcelsystemen in zowel het bestelauto- als bussegment niet meer dan 30% hoger mogen zijn dan die van de dieselaandrijfsystemen.

Gezien de inspanningen van grote automobielfabrikanten zoals Daimler Benz, Chrysler, Ford, Mazda e.a. om in 2004 een commerciële brandstofcelauto op de (vermoedelijk Californische) markt te brengen, is het niet onrealistisch dat in 2008 voertuigen met brandstofcelsystemen beschikbaar zijn die nog 'slechts' 30% duurder zijn dan de dan beschikbare dieselveertuigen.



Figuur 4.4 Toegestane kosten voor waterstof en brandstofcelsystemen in 2003



Figuur 4.5 Toegestane kosten voor waterstof en brandstofcelsystemen in 2008

4.6 Conclusies

In de kwantitatieve analyses zijn de brandstofceltechnologie en de verbrandingsmotoren op LPG en CNG vergeleken met de verbeterde dieseltechnologie zoals die naar verwachting in 2003 en 2008 beschikbaar is. De meerkosten van de alternatieve technologieën zijn afgezet tegen de extra afname van NO_x-emissies door de inzet van deze technologieën. De meerkosten zijn uitgedrukt per gram gereduceerde NO_x-emissie. Geconcludeerd kan worden dat het terugdringen van voertuigemissies op een termijn van 10 jaar en op basis van brandstofsystemen duurder is dan op basis van verbeterde diesel, LPG of CNG.

Uit analyses waarin de toegestane kosten voor waterstof en brandstofsystemen zijn bepaald, ervan uitgaande dat NO_x-reductie door inzet van voertuigen op brandstofsystemen even kosteneffectief moet zijn als NO_x-reductie op basis van de inzet van LPG voertuigen blijkt dat:

- De meerkosten van de brandstofsystemen de meerkosten van LPG-systemen dienen te benaderen.
- De brandstofkosten in deze periode met de helft moeten afnemen (hetgeen overeenkomt met een kostendaling van f 0,42/kg/jaar). Volgens [23] zijn diverse productiemethoden beschikbaar waarmee een beduidend lagere productieprijis dan de in deze studie gehanteerde waarde van 8.73 f /kg kan worden gerealiseerd (zie Tabel 7 in bijlage A).

Bij een dergelijke brandstofprijs mag de aanschafprijs van bestelbussen op brandstofcellen iets hoger zijn dan die van de verbeterde dieseltechnologie maar moet hij iets lager zijn dan die van LPG-voertuigen. In geval van de bus mag de aanschafprijs 30% hoger zijn dan in het geval van de aandrijving op diesel. Dergelijke toekomstige kosten en kostendalingen lijken niet onwaarschijnlijk gezien de inspanningen van grote automobielabrikanten zoals Daimler Benz, Chrysler, Ford, Mazda e.a. om in 2004 een commerciële brandstofcelauto op de (vermoedelijk Californische) markt te brengen.

Brandstofsystemen kunnen echter ook wel degelijk een rol spelen wanneer de kosten niet zo sterk dalen. Immers, de totale emissiereducties die kunnen worden bereikt met de introductie van brandstofsystemen liggen aanzienlijk hoger dan wat kan worden bereikt met verbeterde diesel, LPG en CNG voertuigen. Indien in de toekomst hoge emissiereducties gewenst zijn is de inzet van brandstofsystemen of hybride voertuigen onvermijdelijk. In 2008 zijn de reductiekosten per gram gereduceerde emissie voor brandstofsystemen in bussen of vrachtwagens drie keer zo hoog als voor verbeterde dieselvoertuigen. (In 2003 is dit verschil nog een factor 13.) Tegen het jaar 2010 is reductie door de inzet van brandstofsystemen derhalve realiseerbaar tegen reductiekosten die nog iets hoger liggen dan de reductiekosten op basis van verbeterde dieseltechnologie. Wellicht dat de emissienormstelling zich tegen die tijd dan ook richt op met brandstofcellen uitgevoerde voertuigen en hybride voertuigen haalbare emissies.

Een additioneel voordeel van brandstofsystemen boven verbeterde diesel, LPG en CNG voertuigen is dat geluidhinder slechts in beperkte mate kan worden teruggedrongen door de inzet van LPG en CNG voertuigen of verbeterde dieselvoertuigen terwijl drastische reducties kunnen worden bereikt door de inzet van elektrische voertui-

gen en voertuigen op brandstofcellen. In het kader van zowel hoge gewenste reductiepercentages als een gewenste afname van geluidhinder is de vergelijking tussen hybride en brandstofcelsystemen interessant. Bussen op brandstofcellen en hybride bussen zijn op een termijn van 10 jaar vergelijkbaar qua prijs. In dit marktsegment liggen derhalve redelijke kansen voor de brandstofcellen in mobiele toepassingen.

5. MARKTKANSEN VOOR BRANDSTOFCELAANDRIJVING

De kansen voor brandstofcellen in mobiele toepassingen zijn bestudeerd in het licht van de huidige en toekomstige beleidsvoornemens en op basis van milieutechnische en economische aspecten.

De kansen zijn bestudeerd in de volgende marktsegmenten binnen de transportsector:

- het goederenvervoer per bestelauto,
- het goederenvervoer per vrachtwagen,
- het personenvervoer per bus.

De concurrerende aandrijftechnologieën die zijn beschouwd zijn:

- verbeterde dieselmotoren,
- gasmotor (LPG/CNG),
- hybride systemen.

Voor het brandstofcelsysteem wordt uitgegaan van waterstof als brandstof. (Deze keuze is voornamelijk bepaald door de beschikbaarheid aan data.)

De huidige en toekomstige beleidsvoornemens.

De huidige en toekomstige beleidsvoornemens zijn beschreven in hoofdstuk 3. Er zijn weinig beleidsmaatregelen die direct gericht zijn op toepassing of onderzoek naar alternatieve brandstoffen en aandrijftechnologieën. Wel bevatten beleidsnota's veel maatregelen die indirecte gevolgen kunnen hebben op de toepassing van alternatieve brandstoffen en aandrijftechnologieën.

Indirecte maatregelen met positieve gevolgen zijn de voorgenomen aanzienlijke reducties van diverse emissies (NO_x, VOS, CO, deeltjes en CO₂) en geluid door voertuigen, de stimulering van de toepassing van voertuigen die rijden op alternatieve brandstoffen, en het feit dat de overheid diverse onderzoeksprogramma's heeft geïnitieerd die zorgen voor de financiering van technologieontwikkeling in de vervoerssector. Qua alternatieve brandstoffen liggen de prioriteiten bij LPG en CNG, qua alternatieve technologieën bij elektrisch en hybride voertuigen. Voertuigen op brandstofcellen komen in de regelingen niet als afzonderlijke categorie voor. Dit kan in de nabije toekomst veranderen. (In wezen is een voertuig op brandstofcellen echter een bijzondere speciale uitvoering van een elektrisch voertuig.)

Indirecte beleidsmaatregelen met mogelijk negatieve gevolgen voor de brandstofceltechnologie zijn het feit dat de overheid de toepassing van gasvormige brandstoffen als LPG en CNG momenteel nadrukkelijk bevordert en maatregelen die het huidige vrachtverkeer faciliteren. Denk hierbij aan het in gebruik stellen van spits- en vrachtwagenstroken en het medegebruik van busbanen door vrachtverkeer; in beide situaties komt de dieselmotor (energetisch gezien) optimaal tot zijn recht. Deze negatieve gevolgen gelden overigens met name voor de korte termijn. Op de lange termijn kan de brandstofceltechnologie mogelijk profiteren van de aandacht voor alternatieve

brandstoffen hetgeen in wezen ook aan het stimuleren van brandstoffen als LPG en CNG ten grondslag ligt.

Milieutechnische en economische beoordeling

Een integrale beoordeling van de milieutechnische en economische aspecten van brandstofcellen was aan de orde in hoofdstuk 4. Op basis van de resultaten kan geconcludeerd worden dat, indien gewenst, tegen het jaar 2010 brandstofcellen een bijdrage kunnen leveren aan *verdere* emissiereducties door vrachtwagens en bussen. De kosten van reductie op basis van brandstofcellen in 2010 liggen slechts een weinig hoger dan de kosten van reductie op basis van de verbeterde dieseltechnologie in het jaar 2008. Wellicht dat de emissienormstelling zich tegen die tijd dan ook richt op emissies die met voertuigen met brandstofcellen haalbaar zijn. Voor bestelauto's ligt een dergelijke ontwikkeling minder voor de hand daar de reductiekosten op basis van verbeterde dieselveertuigen vele malen lager liggen dan de reductiekosten op basis van bestelauto's met brandstofcellen.

Met voertuigen op brandstofcellen kunnen emissiereducties worden bereikt die aanzienlijk hoger liggen dan wat kan worden bereikt met verbeterde diesel, LPG en CNG voertuigen. Slechts hybride vrachtwagens en bussen (in een diesel elektrische uitvoering) kunnen mogelijk aan vergelijkbare emissie-eisen voldoen als de vrachtwagens en bussen uitgevoerd met brandstofcellen. Hybride bussen zijn tegen het jaar 2010 naar verwachting voor vergelijkbare prijzen verkrijgbaar als voertuigen met brandstofcellen. Additionele voordelen van beide voertuigtypen en marketingstrategieën zullen derhalve mede bepalen of en welk voertuigtype een marktaandeel kan veroveren.

LPG en CNG voertuigen zijn bij hoge gewenste emissiereducties geen concurrent voor voertuigen met brandstofcellen. Bij lagere gewenste emissiereducties wel. Aanzienlijke dalingen van de brandstofkosten en de investeringskosten zijn noodzakelijk wil de inzet van voertuigen op brandstofcellen met als doel de NO_x-emissies te reduceren even kosteneffectief als de inzet van voertuigen op LPG. Bij een daling van de waterstofprijs met 50% tussen nu en 2008 zijn in de marktsegmenten bussen en bestelauto's afnamen van de investeringskosten noodzakelijk die zeer wel mogelijk worden geacht. Gezien de inspanningen van grote autofabrikanten zoals Daimler Benz, Chrysler, Ford Mazda e.a. om in 2004 een commerciële brandstofcelauto op de (vermoedelijk Californische) markt te brengen, is het niet onrealistisch dat in 2008 voertuigen met brandstofcellen beschikbaar zijn die nog 'slechts' 30% duurder zijn dan de dan beschikbare dieselveertuigen. Tezamen met de daling van de waterstofprijs, die eveneens voor mogelijk wordt gehouden (zie Tabel 7 bijlage A), maakt dit de brandstofceltechnologie concurrerend met de LPG-technologie.

Een additioneel voordeel van voertuigen met brandstofcellen, maar ook van hybride voertuigen, ten opzicht van voertuigen op LPG en CNG voertuigen is dat geluidhinder drastisch kan worden beperkt door de inzet van elektrische voertuigen en voertuigen op brandstofcellen terwijl geluidhinder slechts in beperkte mate kan worden teruggedrongen door de inzet van LPG en CNG voertuigen of verbeterde dieselveertuigen.

Er kan worden geconcludeerd dat bij beleid waarin ingezet wordt op verder emissiereductie door voertuigen op een termijn van 10 jaar, er kansen bestaan voor brandstofcellen in mobiele toepassingen. Deze kansen lijken het grootst voor de toepassing in bussen.

REFERENTIES

- [1] B. Elzen, R. Hoogma, J. Schot: *Mobiliteit met toekomst*. Ministerie van Verkeer en Waterstaat, oktober 1996.
- [2] R.C.N. Wit, J.M.W. Dings, G.C. Bergsma, S. de Bruyn, J. Vroonhof: *DEOS 2030. verslagen miniworkshops en achtergronddocumenten (1. personenverkeer, 2. goederenvervoer, 3. CO₂-problematiek, 4. afvalstromen)*. Centrum voor Energiebesparing en Schone Technologie, Delft, november 1995.
- [3] Nationaal Milieubeleidsplan 3, 1999-2003, 1998.
- [4] Ministerie van VROM: *Voertuigtechniek en brandstoffen (tot 2010)*. 1996.
- [5] Ministerie van V&W: *Samen werken aan bereikbaarheid (tot 2005)*. Maatregelenpakket stadsgewesten, 1996.
- [6] Ministerie van V&W: *Transport in balans (tot 2010). Beleidsmaatregelen technologie en wegvervoer*. 1996.
- [7] Nota milieu en economie, 1997.
- [8] R.M.M. van den Brink, G.P. van Wee: *Energiegebruik en emissies per vervoerwijze*. Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu. Bilthoven, mei 1997.
- [9] G. Hörmandinger: *Fuel cells in Transportation*. Centre for Environmental technology. University of London, september 1995.
- [10] CBS: *Zakboek Verkeer en Vervoer*. Voorburg/Heerlen, december 1997.
- [11] Dings: *Kosten- en milieu-effecten van technische maatregelen in het verkeer*. Centrum voor Energiebesparing. Delft, mei 1996.
- [12] S.A.M. Jaasma, P.E.C. Krieckaert: *Waterstof als brandstof voor zuigermotoren*. Novem, Utrecht, 1994.
- [13] Dhr. van den Borg, Den Oudsten Bussen, persoonlijk commentaar, 1998.
- [14] Dhr. Warnaar, NZH, persoonlijk commentaar, 1998.
- [15] Belastingdienst: *Tarieven met ingang van 1 juli 1997. Motorrijtuigenbelasting*. 1998.
- [16] Dhr. Huygen: Mercedes, persoonlijk commentaar, 1998.
- [17] EVO: Bestelauto. Overzicht van lichte bedrijfsauto's voor handel, industrie en agrarisch bedrijfsleven. Zoetermeer, 1990.
- [18] EVO: *Kilometerkosten. Personen- en bestelauto's. Een overzicht van jaarkilometrages en kostenbegrotingen*. Zoetermeer, 1998.
- [19] *Nutzfahrzeugmagazin*: Lastauto omnibus. Swets, Technik, Trends. Volume 69, Issue 12, 1992.
- [20] Dhr. Loymeyer, DAF, persoonlijk commentaar, 1998.
- [21] Dhr. van der Heyden, DAF trucks, persoonlijk commentaar, 1998.
- [22] Dhr. van den Brink, RIVM, persoonlijk commentaar, 1998.
- [23] G. Hörmandinger, N.J.D. Lucas: *An evaluation of the economics of fuel cells in urban buses*, International Journal of Energy Research, Volume 21, 495-526, 1997.

BIJLAGE A KOSTEN

Tabel 1 *Zware stadsbus, om de 300m halte, lage vloer, 10,5 ton*

	Diesel	LPG	Hybride
MRB [<i>f</i> /jr]	1384	0	0
Onderhoud [<i>f</i> /km]	0,26	0,33	0,40
Kosten bus [<i>f</i>]	350.000 excl.	410.000 excl.	800.000 excl.
Afschrijvingstermijn[jr]	12	12	12
Brandstof [<i>f</i> /km]	0,50	0,33	0,17
Gebruik	1 op 2	1 op 1,5	1 op 6
Brandstof [<i>f</i> /ltr]	1,00	0,50	0,50
Verzekering			
Restwaarde [<i>f</i>]	10.000	10.000	10.000

Bron: [13]

Toelichting bij Tabel 1:

- Streekbussen leggen langere afstanden af; hiervoor zijn geen gegevens van hybride en LPG beschikbaar. Voor diesel zijn wel gegevens beschikbaar. Voor deze bussen geldt: onderhoud 0,24 pkm, gebruik 1 op 3; overige gegevens als in tabel voor diesel stadsbus.

Tabel 2 *Stads- en streekbus*

	Diesel	LPG	CNG
MRB [<i>f</i> /jr]	2420	-	-
Onderhoud [<i>f</i> /km]	0,38	0,45	0,45
Kosten bus [<i>f</i>]	340.000	390.000	390.000
Afschrijving [<i>f</i> /jr]	34.000		
Termijn[jr]	10	10	10
Brandstof [<i>f</i> /km]	0,38		
Gebruik	1 op 2,5	1 op 3,1	1 op 3,1
Brandstof [<i>f</i> /ltr]	1,00	0,35	0,28-0,50
Verzekering [<i>f</i> /jr]	3800	4000	4000
Restwaarde [<i>f</i>]			

Bron: [14, 15]

Toelichting Tabel 2:

- MRB: afhankelijk convenant,
- Onderhoud: inclusief reparatie en banden, exclusief schade en modificaties.

Ad Tabel 1 + 2:

- CRT (Continuous Regenerating Trap): lijkt veelbelovend + zeer effectief
- Nieuwe ontwikkelingen: lichtgewicht bussen à 7 ton, (normaal 11 ton).
- Op basis van een convenant is MRB voor LPG en CNG *f* 0,0.

Tabel 3 *Vrachtwagens en bestelauto's*

	Vrachtwagen 15 ton, diesel	Bestelauto 3 ton, diesel	Bestelauto 3 ton, lpg
MRB [<i>f</i> /jr]	920	715	690
Onderhoud [<i>f</i> /km]	0,085	0,0625	0,07
Kosten bus			
Afschrijving [<i>f</i> /jr]	19000	7300	10300
Afschrijvingstermijn[jr]	6	5	5
Brandstof [<i>f</i> /km]			
Gebruik	1 op 4,5	1 op 10	1 op 8
Brandstof [<i>f</i> /ltr]			
Verzekering [<i>f</i> /jr]	4600	2875	2850
Restwaarde			

Bron: [16,17]

Toelichting Tabel 3:

- Inzet in stedelijke agglomeraties.
- Afschrijving: 60000 km per jaar vrachtwagen; 35000 km per jaar bestelauto.

Tabel 4 *Vrachtwagens en bestelauto's*

	Vrachtwagen diesel 9 ton laadvermogen, < 70000 km pj	Vrachtwagen diesel 9 ton laadvermogen > 70000 km pj	Vgl. Mercedes Truck diesel 15 ton
MRB [<i>f</i> /jr]	2505	2505	920
Onderhoud [<i>f</i> /km]	0,154	0,154	0,085
Kosten bus [<i>f</i>]			
Afschrijving [<i>f</i> /jr]	14971	0,21 pkm	19000
Afschrijvingstermijn[jr]	7	500.000 km	6
Brandstof [<i>f</i> /km]	0,24	0,24	
Gebruik	1 op 5,3	1 op 5,3	1 op 4,5
Brandstof [<i>f</i> /ltr]	1,25	1,25	1,00
Verzekering [<i>f</i> /jr]	7200	7200	4600
Restwaarde			

Bron: [18]

Toelichting Tabel 4:

- Onderhoud: omvat afschrijving banden, smeerolie, reparatie en onderhoud.

Ad Tabel 3 en 4: vergelijk met Duits artikel [19];

- daar liggen de onderhoudskosten tussen de 20 en 25 Deutsch Pfennig per kilometer
- de totale kosten liggen rond de DM 1.10 per kilometer.

Tabel 5 *Vrachtwagens*

	Vrachtwagen diesel, 18 ton	Vrachtwagen LPG	Vrachtwagen CNG
MRB			
Onderhoud [<i>f</i> /jr]	6500 pj	6500 pj	6500 pj
Kosten vrachtwagen [<i>f</i>]	160000	t.o.v. diesel +50.000 à 80.000 toekomst + 15.000	t.o.v. diesel +50.000 à 80.000 toekomst +15.000
Afschrijving			
Afschrijvingstermijn [jr]	6	6	6
Brandstof [<i>f</i> /km]			
Gebruik	1 op 5	1 op 3,13	1 op 3,13
Brandstof [<i>f</i> /ltr]			
Verzekering			
Restwaarde			

Bron: [20]

Toelichting Tabel 5:

- Onderhoud: exclusief banden.

Tabel 6 *Brandstofcelbus*

	Brandstofcelbus
MRB	-
Onderhoud [<i>f</i> /km]	0,31
Kosten bus [<i>f</i>]	546.240
Afschrijvingstermijn [jr]	12 ?
Brandstof [<i>f</i> /km]	1,05
Gebruik	
Brandstof [<i>f</i> /kg]	8,37
Verzekering	
Restwaarde	

Bron: [9]

Toelichting Tabel 6:

- Dollarkoers 1993: *f* 1,8.

Tabel 7 *Kosten H₂ als functie van productiemethode*

Kosten		Productiemethode
[US\$/GJ]	[f/kg] (ca.)	
38	11	On site reforming for a 10 bus fleet
14.69	4.2	Compressed H ₂ produced from biomass and distributed to a roadside filling station
5-8	1.4-2.3	Steam reforming of natural gas, large plant
11-15	3.1-4.3	Steam reforming of natural gas, small plant
8-9	2.3-2.6	Coal gasification, large plant
13-14	3.7-4	Coal gasification, small plant
24-76	6.9-22	Solar photovoltaics (southwest USA); near term projection (electrolysis)
31-73	8.9-21	Solar thermal (southwest USA); near term projection
9-21	2.6-6	Off-peak hydroelectricity (electrolysis)

Bron: [23]

Tabel 8 *Milieukosten diesel-bestelauto's als gevolg van verschillende emissienormstelling*

NO _x [mg/km] 2002 bbk/ovweg/snelweg	Kosten per voertuig, [f]
Variant 1 690/510/980	500
Variant 2 560/420/800	1075
Variant 3 430/320/610	1625

Bron: [11]

Tabel 9 *Milieukosten benzine-bestelauto's als gevolg van verschillende emissienormstelling*

NO _x [mg/km] 2002 bbk/ovweg/snelweg	Kosten per voertuig, [f]
Variant 1 200/120/300	925
Variant 2 150/92/230	1200
Variant 3 88/55/140	1625

Bron: [11]

Tabel 10 *Milieukosten LPG-bestelauto, introductie 1997-voertuig-normen*

NO _x (mg/km) bbk/ovweg/snelweg	Kosten per voertuig, [f]
207/224/447	500

Bron: [11]

Toelichting Tabellen 8, 9 en 10:

- bbk= binnen bebouwde kom, ovweg= overige wegen en snelweg= snelwegen.
- In het zogenaamde auto/olie programma, dat een initiatief is van de Europese Commissie ACEA (de koepel van Europese voertuigfabrikanten) en Europa (de

koepel van Europese oliemaatschappijen), is een technisch-wetenschappelijke basis voor het Europese beleid dat vanaf 2000 gevoerd gaat worden op het gebied van emissies van wegvoertuigen geleverd. In het programma wordt een aantal normstellingsvarianten bestudeerd. In de Tabellen 7, 8 en 9 wordt hierbij aangesloten.

- Voor de bestelauto's zijn ook HC, CO en Pm emissiecijfers beschikbaar.

Tabel 11 *Milieukosten diesel-vrachtwagen als gevolg van verschillende emissienormstelling*

NO _x [mg/km] 2002	Kosten per voertuig, [f]	Introductiejaar
9,0	800	1990
8,0	1200	1992
7,0	2500	1993
5,9	3200	1998
4,9 [g/kWh]	5000	1998
3,5 [g/kWh]	9500	1998

Bron: [11]

Tabel 12 *Milieukosten diesel-bus als gevolg van verschillende emissienormstelling*

NO _x [mg/km] 2002	Kosten per voertuig, [f]	Introductiejaar
9,0	800	1990
8,0	1200	1992
7,0	2500	1993
5,9	3200	1998
4,9 [g/kWh]	5000	1998
3,5 [g/kWh]	9500	1998

Bron: [11]

Naar aanleiding van Tabel 11 en 12:

- Voor speciale voertuigen op diesel worden gelijke investeringskosten verondersteld.

BIJLAGE B EMISSIES

Tabel I *LPG- en CNG-bus en vrachtwagen.*

[g/kWh], 2000	LPG+ 3W .KAT	LPG, GG 170	CNG, GG 170
NO _x	<1	0,39 (0,46 g/vkm)	0,15-0,21
CO	<0,5	0,25 (0,30 g/vkm)	0,35-0,72
VOS	<0,5	0,01 (0,01 g/vkm)	0,02-0,05
PM	<0,05		

Bron: [21]

Toelichting bij Tabel I:

- kolom 1: veilige waarden,
- kolom 2+ 3: gemeten waarden; ontwikkelingstraject bijna afgerond,
- kolom 3: 1e waarde is o.b.v.NL-gas, 2e waarde is o.b.v. AA-50A-gas.

Toelichting bij de Tabellen II t/m XII:

- Emissies ‘well to wheel’, d.w.z. inclusief emissies brandstof productie en elektriciteitsproductie.

Toelichting bij de Tabellen III t/m XII:

- Emissies volgens EC scenario, dat wil zeggen geen extra beleid na 2000, dus geen beleid dat verder gaat dan Euro4.

Tabel II *Diesel-bus en vrachtwagen*

[g/vkm]	Euro3 2000	Euro4 2005	Euro5 2010
NO _x	4,9	2,5	1,5
CO	2,8	1,0	0,5
VOS	0,8	0,4	0,2
PM	0,11	0,08-0,10	0,08-0,10

Bron: [22]

Toelichting bij Tabel II:

- Euronormen voor dieselmotoren; dat wil zeggen ze gelden voor bussen en vrachtwagens.

Tabel III *CO bestelauto*

[g/vkm]	Bestelauto, kat gasoline	Bestelauto, kat LPG	Bestelauto, direct ingespoten diesel
2000	6,23	2,79	0,34
2005	6,15	2,76	0,33
2010	6,07	2,73	0,33
2020	5,93	2,67	0,33

Bron: [22]

Tabel IV *VOS bestelauto*

[g/vkm]	Bestelauto, kat gasoline	Bestelauto, kat LPG	Bestelauto, direct ingespoten Diesel
2000	0,25	0,22	0,13
2005	0,24	0,21	0,12
2010	0,24	0,21	0,12
2020	0,23	0,21	0,12

Bron: [22]

Tabel V *NO_x bestelauto*

[g/vkm]	Bestelauto, kat gasoline	Bestelauto, kat LPG	Bestelauto, direct ingespoten diesel
2000	0,82	0,18	1,82
2005	0,81	0,18	1,82
2010	0,81	0,18	1,81
2020	0,78	0,17	1,80

Bron: [22]

Tabel VI *PM bestelauto*

[g/vkm]	Bestelauto, kat gasoline	Bestelauto, kat LPG	Bestelauto, direct ingespoten Diesel
2000	0	0	0,09
2005	0	0	0,09
2010	0	0	0,08
2020	0	0	0,08

Bron: [22]

Tabel VII *CO₂ bestelauto*

g/vkm	Bestelauto, kat gasoline	Bestelauto, kat LPG	Bestelauto, direct ingespoten Diesel
2000	317	277	235
2005	313	274	235
2010	309	270	234
2020	300	264	232

Bron: [22]

Tabel VIII *CO vrachtwagens en bussen*

[g/vkm]	Vrachtwagen 3.5-10 ton	Vrachtwagen 10-20 ton	Bus Public
2000	0,87	0,92	1,65
2005	0,85	0,92	1,64
2010	0,84	0,92	1,64
2020	?	?	?

Bron: [22]

Tabel IX *VOS vrachtwagens en bussen*

[g/vkm]	Vrachtwagen 3.5-10 ton	Vrachtwagen 10-20 ton	Bus Public
2000	0,22	0,26	0,53
2005	0,22	0,26	0,53
2010	0,21	0,26	0,53
2020	0,15	0,19	0,39

Bron: [22]

Tabel X *NO_x vrachtwagens en bussen*

[g/vkm]	Vrachtwagen 3.5-10 ton	Vrachtwagen 10-20 ton	Bus Public
2000	2,40	3,55	6,75
2005	2,36	3,49	6,72
2010	2,32	3,43	6,69
2020	1,12	1,66	3,31

Bron: [22]

Tabel XI *PM vrachtwagens en bussen*

[g/vkm]	Vrachtwagen 3.5-10 ton	Vrachtwagen 10-20 ton	Bus Public
2000	0,05	0,07	0,15
2005	0,05	0,07	0,15
2010	0,04	0,07	0,15
2020	0,03	0,05	0,12

Bron: [22]

Tabel XII *CO₂ vrachtwagens en bussen*

[g/vkm]	Vrachtwagen 3.5-10 ton	Vrachtwagen 10-20 ton	Bus Public
2000	333	489	906
2005	327	481	904
2010	321	473	903
2020	310	457	900

Bron: [22]

Tabel XIII *Emissies brandstofcelbus en dieselbus*

[g/kWh]	Brandstofcel bus	Dieselbus
NO _x	0,1185	1,9443
CO	0,0072	0,056
NMVOG	0,0085	0,0166
SO ₂	0,3253	0,092
PM		0,2955
CO ₂	383,1	279,78

Bron: [9]

Toelichting bij Tabel XIII:

- Omrekenfactoren voor g/kWh (Tabel XIII) naar g/vkm (Tabel XIV):
 - Brandstofcel 15,1 MJ/vkm
 - Diesel 25,1 MJ/vkm

Tabel XIV *Emissies brandstofcel bus en dieselbus*

[g/vkm]	Brandstofcelbus	Dieselbus
NO _x	0,4973	13,56
CO	0,0301	13,33
NMVOG	0,0356	0,116
SO ₂	1,3644	0,641
PM		2,06
CO ₂	1607,0	1951,0

Bron: [9]

BIJLAGE C RESULTATEN SCENARIO'S 2003

Basis

Scenario RIVM/DAF

BESTELAUTO 3TON 50KW		
	jaarlijkse kosten	kosten/gr
Diesel	16175	
Fuel cell	39694	1,21
LPG	17801	0,09

VRACHTAUTO 10-20 ton 200KW		
	jaarlijkse kosten	kosten/gr
Diesel	46619	
Fuel cell	110821	0,32
LPG	46230	0,00
CNG	46870	

BUS 11 TON 200KW		
	jaarlijkse kosten	kosten/gr
Diesel	102377	
Fuel cell	166426	0,17
LPG	100100	-0,01
CNG	100917	
Hybride	153777	

Brandstofprijs hoog

Scenario RIVM/DAF

BESTELAUTO 3TON 50KW		
	jaarlijkse kosten	kosten/gr
Diesel	16800	
Fuel cell	39694	1,18
LPG	18582	0,10

VRACHTAUTO 10-20 ton 200KW		
	jaarlijkse kosten	kosten/gr
Diesel	49119	
Fuel cell	110821	0,31
LPG	50230	0,01
CNG	46870	

BUS 11 TON 200KW		
	jaarlijkse kosten	kosten/gr
Diesel	108377	
Fuel cell	166426	0,15
LPG	107600	0,00
CNG	100917	
Hybride	155027	

Scenario Euro

BESTELAUTO 3TON 50KW		
	jaarlijkse kosten	kosten/gr
Diesel	16175	
Fuel cell	39694	1,79
LPG	17801	0,14

VRACHTAUTO 10-20 ton 200KW		
	jaarlijkse kosten	kosten/gr
Diesel	46619	
Fuel cell	110821	0,40
LPG	46230	0,00
CNG	46870	

BUS 11 TON 200KW		
	jaarlijkse kosten	kosten/gr
Diesel	102377	
Fuel cell	166426	0,26
LPG	100100	-0,01
CNG	100917	
Hybride	153777	

Scenario Euro

BESTELAUTO 3TON 50KW		
	jaarlijkse kosten	kosten/gr
Diesel	16800	
Fuel cell	39694	1,74
LPG	18582	0,15

VRACHTAUTO 10-20 ton 200KW		
	jaarlijkse kosten	kosten/gr
Diesel	49119	
Fuel cell	110821	0,39
LPG	50230	0,01
CNG	46870	

BUS 11 TON 200KW		
	jaarlijkse kosten	kosten/gr
Diesel	108377	
Fuel cell	166426	0,23
LPG	107600	0,00
CNG	100917	
Hybride	155027	

Discontovoet hoog
Scenario RIVM/DAF

BESTELAUTO 3TON 50KW		
	jaarlijkse kosten	kosten/gr
Diesel	16654	
Fuel cell	41288	1,27
LPG	18463	0,10

VRACHTAUTO 10-20 ton 200KW		
	jaarlijkse kosten	kosten/gr
Diesel	48262	
Fuel cell	115057	0,33
LPG	48028	0,00
CNG	48668	

BUS 11 TON 200KW		
	jaarlijkse kosten	kosten/gr
Diesel	107118	
Fuel cell	174095	0,18
LPG	105608	0,00
CNG	106387	
Hybride	164705	

Wegenbelasting laag
Scenario RIVM/DAF

BESTELAUTO 3TON 50KW		
	jaarlijkse kosten	kosten/gr
Diesel	16175	
Fuel cell	39694	1,21
LPG	17111	0,05

VRACHTAUTO 10-20 ton 200KW		
	jaarlijkse kosten	kosten/gr
Diesel	46619	
Fuel cell	110821	0,32
LPG	45382	-0,01
CNG	46022	

BUS 11 TON 200KW		
	jaarlijkse kosten	kosten/gr
Diesel	102377	
Fuel cell	166426	0,17
LPG	100100	-0,01
CNG	100917	
Hybride	153777	

Scenario Euro

BESTELAUTO 3TON 50KW		
	jaarlijkse kosten	kosten/gr
Diesel	16654	
Fuel cell	41288	1,87
LPG	18463	0,15

VRACHTAUTO 10-20 ton 200KW		
	jaarlijkse kosten	kosten/gr
Diesel	48262	
Fuel cell	115057	0,42
LPG	48028	0,00
CNG	48668	

BUS 11 TON 200KW		
	jaarlijkse kosten	kosten/gr
Diesel	107118	
Fuel cell	174095	0,27
LPG	105608	-0,01
CNG	106387	
Hybride	164705	

Scenario Euro

BESTELAUTO 3TON 50KW		
	jaarlijkse kosten	kosten/gr
Diesel	16175	
Fuel cell	39694	1,79
LPG	17111	0,08

VRACHTAUTO 10-20 ton 200KW		
	jaarlijkse kosten	kosten/gr
Diesel	46619	
Fuel cell	110821	0,40
LPG	45382	-0,01
CNG	46022	

BUS 11 TON 200KW		
	jaarlijkse kosten	kosten/gr
Diesel	102377	
Fuel cell	166426	0,26
LPG	100100	-0,01
CNG	100917	
Hybride	153777	

*Brandstofgebruik vrachtauto met brandstofcellen hoog**Scenario RIVM/DAF*

BESTELAUTO 3TON 50KW		
	jaarlijkse kosten	kosten/gr
Diesel	16175	
Fuel cell	39694	1,21
LPG	17801	0,09
VRACHTAUTO 10-20 ton 200KW		
	jaarlijkse kosten	kosten/gr
Diesel	46619	
Fuel cell	136978	0,48
LPG	46230	0,00
CNG	46870	
BUS 11 TON 200KW		
	jaarlijkse kosten	kosten/gr
Diesel	102377	
Fuel cell	166426	0,17
LPG	100100	-0,01
CNG	100917	
Hybride	153777	

Scenario Euro

BESTELAUTO 3TON 50KW		
	jaarlijkse kosten	kosten/gr
Diesel	16175	
Fuel cell	39694	1,79
LPG	17801	0,14
VRACHTAUTO 10-20 ton 200KW		
	jaarlijkse kosten	kosten/gr
Diesel	46619	
Fuel cell	136978	0,62
LPG	46230	0,00
CNG	46870	
BUS 11 TON 200KW		
	jaarlijkse kosten	kosten/gr
Diesel	102377	
Fuel cell	166426	0,26
LPG	100100	-0,01
CNG	100917	
Hybride	153777	

*Kosten infrastructuur hoog**Scenario RIVM/DAF*

BESTELAUTO 3TON 50KW		
	jaarlijkse kosten	kosten/gr
Diesel	16175	
Fuel cell	39694	1,21
LPG	17801	0,09
VRACHTAUTO 10-20 ton 200KW		
	jaarlijkse kosten	kosten/gr
Diesel	46619	
Fuel cell	110821	0,32
LPG	46230	0,00
CNG	46870	
BUS 11 TON 200KW		
	jaarlijkse kosten	kosten/gr
Diesel	102377	
Fuel cell	166426	0,17
LPG	101624	0,00
CNG	101907	
Hybride	153777	

Scenario Euro

BESTELAUTO 3TON 50KW		
	jaarlijkse kosten	kosten/gr
Diesel	16175	
Fuel cell	39694	1,79
LPG	17801	0,14
VRACHTAUTO 10-20 ton 200KW		
	jaarlijkse kosten	kosten/gr
Diesel	46619	
Fuel cell	110821	0,40
LPG	46230	0,00
CNG	46870	
BUS 11 TON 200KW		
	jaarlijkse kosten	kosten/gr
Diesel	102377	
Fuel cell	166426	0,26
LPG	101624	0,00
CNG	101907	
Hybride	153777	

Brandstofcel-analyse

Scenario RIVM/DAF

BESTELAUTO 3TON 50KW		
	jaarlijkse kosten	kosten/gr
Diesel	16800	
Fuel cell	39694	1,18
LPG	18582	0,10

VRACHTAUTO 10-20 ton 200KW		
	jaarlijkse kosten	kosten/gr
Diesel	49119	
Fuel cell	110821	0,31
LPG	50230	0,01
CNG	46870	

BUS 11 TON 200KW		
	jaarlijkse kosten	kosten/gr
Diesel	108377	
Fuel cell	166426	0,15
LPG	109124	0,00
CNG	101907	
Hybride	155027	

Noodzakelijke kostenreducties

Scenario RIVM/DAF

BESTELAUTO 3TON 50KW		
	jaarlijkse kosten	kosten/gr
Diesel	16800	
Fuel cell	18815	0,10
LPG	18582	0,10

VRACHTAUTO 10-20 ton 200KW		
	jaarlijkse kosten	kosten/gr
Diesel	49119	
Fuel cell	52016	0,01
LPG	50230	0,01
CNG	46870	

BUS 11 TON 200KW		
	jaarlijkse kosten	kosten/gr
Diesel	108377	
Fuel cell	107114	0,00
LPG	109124	0,00
CNG	101907	
Hybride	155027	

Scenario Euro

BESTELAUTO 3TON 50KW		
	jaarlijkse kosten	kosten/gr
Diesel	16800	
Fuel cell	39694	1,74
LPG	18582	0,15

VRACHTAUTO 10-20 ton 200KW		
	jaarlijkse kosten	kosten/gr
Diesel	49119	
Fuel cell	110821	0,39
LPG	50230	0,01
CNG	46870	

BUS 11 TON 200KW		
	jaarlijkse kosten	kosten/gr
Diesel	108377	
Fuel cell	166426	0,23
LPG	109124	0,00
CNG	101907	
Hybride	155027	

Scenario Euro

BESTELAUTO 3TON 50KW		
	jaarlijkse kosten	kosten/gr
Diesel	16800	
Fuel cell	18815	0,15
LPG	18582	0,15

VRACHTAUTO 10-20 ton 200KW		
	jaarlijkse kosten	kosten/gr
Diesel	49119	
Fuel cell	52016	0,02
LPG	50230	0,01
CNG	46870	

BUS 11 TON 200KW		
	jaarlijkse kosten	kosten/gr
Diesel	108377	
Fuel cell	107114	-0,01
LPG	109124	0,00
CNG	101907	
Hybride	155027	

BIJLAGE D RESULTATEN SCENARIO'S 2008

Basis-analyse

Scenario euro

BESTELAUTO 3TON 50KW		
	jaarlijkse kosten	kosten/gr
Diesel	17537	
Fuel cell	29142	2,25
LPG	19234	0,30

VRACHTAUTO 10-20 ton 200KW		
	jaarlijkse kosten	kosten/gr
Diesel	51401	
Fuel cell	84113	0,44
LPG	49688	-0,02
CNG	50328	

BUS 11 TON 200KW		
	jaarlijkse kosten	kosten/gr
Diesel	110263	
Fuel cell	144632	0,30
LPG	107796	-0,02
CNG	108586	
Hybride	165987	

Discontovoet hoog

Scenario euro

BESTELAUTO 3TON 50KW		
	jaarlijkse kosten	kosten/gr
Diesel	18072	
Fuel cell	30213	2,36
LPG	19955	0,33

VRACHTAUTO 10-20 ton 200KW		
	jaarlijkse kosten	kosten/gr
Diesel	53302	
Fuel cell	87148	0,45
LPG	51631	-0,02
CNG	52271	

BUS 11 TON 200KW		
	jaarlijkse kosten	kosten/gr
Diesel	115488	
Fuel cell	151177	0,32
LPG	113719	-0,02
CNG	114468	
Hybride	177729	

Brandstofprijs hoog

Scenario euro

BESTELAUTO 3TON 50KW		
	jaarlijkse kosten	kosten/gr
Diesel	18162	
Fuel cell	29142	2,13
LPG	20015	0,32

VRACHTAUTO 10-20 ton 200KW		
	jaarlijkse kosten	kosten/gr
Diesel	53901	
Fuel cell	84113	0,40
LPG	53688	0,00
CNG	50328	

BUS 11 TON 200KW		
	jaarlijkse kosten	kosten/gr
Diesel	116263	
Fuel cell	144632	0,25
LPG	115296	-0,01
CNG	108586	
Hybride	167237	

Wegenbelasting laag

Scenario euro

BESTELAUTO 3TON 50KW		
	jaarlijkse kosten	kosten/gr
Diesel	17537	
Fuel cell	29142	2,25
LPG	18544	0,18

VRACHTAUTO 10-20 ton 200KW		
	jaarlijkse kosten	kosten/gr
Diesel	51401	
Fuel cell	84113	0,44
LPG	48840	-0,04
CNG	49480	

BUS 11 TON 200KW		
	jaarlijkse kosten	kosten/gr
Diesel	110263	
Fuel cell	144632	0,30
LPG	107796	-0,02
CNG	108586	
Hybride	165987	

Brandstofgebruik vrachtauto met brandstofcel hoog

Scenario euro

BESTELAUTO 3TON 50KW		
	jaarlijkse kosten	kosten/gr
Diesel	17537	
Fuel cell	29142	2,25
LPG	19234	0,30

VRACHTAUTO 10-20 ton 200KW		
	jaarlijkse kosten	kosten/gr
Diesel	51401	
Fuel cell	110269	0,94
LPG	49688	-0,02
CNG	50328	

BUS 11 TON 200KW		
	jaarlijkse kosten	kosten/gr
Diesel	110263	
Fuel cell	144632	0,30
LPG	107796	-0,02
CNG	108586	
Hybride	165987	

Brandstofcel-analyse

Scenario euro

BESTELAUTO 3TON 50KW		
	jaarlijkse kosten	kosten/gr
Diesel	18162	
Fuel cell	29142	2,13
LPG	20015	0,32

VRACHTAUTO 10-20 ton 200KW		
	jaarlijkse kosten	kosten/gr
Diesel	53901	
Fuel cell	84113	0,40
LPG	53688	0,00
CNG	50328	

BUS 11 TON 200KW		
	jaarlijkse kosten	kosten/gr
Diesel	116263	
Fuel cell	144632	0,25
LPG	116934	0,01
CNG	109648	
Hybride	167237	

Kosten infrastructuur hoog

Scenario euro

BESTELAUTO 3TON 50KW		
	jaarlijkse kosten	kosten/gr
Diesel	17537	
Fuel cell	29142	2,25
LPG	19234	0,30

VRACHTAUTO 10-20 ton 200KW		
	jaarlijkse kosten	kosten/gr
Diesel	51401	
Fuel cell	84113	0,44
LPG	49688	-0,02
CNG	50328	

BUS 11 TON 200KW		
	jaarlijkse kosten	kosten/gr
Diesel	110263	
Fuel cell	144632	0,30
LPG	109434	-0,01
CNG	109648	
Hybride	165987	

Noodzakelijke kostenreducties

Scenario euro

BESTELAUTO 3TON 50KW		
	jaarlijkse kosten	kosten/gr
Diesel	18162	
Fuel cell	19814	0,32
LPG	20015	0,32

VRACHTAUTO 10-20 ton 200KW		
	jaarlijkse kosten	kosten/gr
Diesel	53901	
Fuel cell	54132	0,00
LPG	53688	0,00
CNG	50328	

BUS 11 TON 200KW		
	jaarlijkse kosten	kosten/gr
Diesel	116263	
Fuel cell	117470	0,01
LPG	116934	0,01
CNG	109648	
Hybride	167237	