

RIVM rapport 773002022/2002

**Verkeer in het Platform Integrale  
Energieanalyse (PIE)**

R.M.M. van den Brink en P.F.L. Feimann

Dit onderzoek werd verricht in opdracht en ten laste van MAP-Milieu, in het kader van project 773002, doelgroepproject Verkeer en Vervoer, mijlpaal 773002/01/AK

RIVM, Postbus 1, 3720 BA Bilthoven, telefoon: 030 - 274 91 11; fax: 030 - 274 29 71



## Abstract

This report describes the Traffic and Transport submodel (PIE-VeV). This submodel is part of a larger model named PIE that integrates energy demand and energy production sectors. The main goal of PIE is to assess the effects on national emissions of changes in the demand for different energy carriers (oil, coal, natural gas, etc.) by different sectors, like traffic and transport. Changes in for example the share of diesel in road traffic will lead to changes in emissions in the sector traffic and transport but also in the fuel production sector. In PIE-VeV the sector transport and transport is divided into passenger transport and freight transport.

In PIE-VeV changes in energy demand by the different transport means within passenger or freight transport are 'broke down' into several explanatory factors like 1) increase in transport volume, 2) changes in modal split and occupancy or load factor, 3) changes in energy use per kilometre and 4) changes in engine-efficiency and the distribution of engine types.

PIE-VeV can not be used to model transport demand, so it will not replace the existing transport models. With PIE-VeV it is possible to estimate the effects on emissions of changes in several economic parameters in comparison to a reference scenario. Also the effects on emissions of changes in modal split, load factors, energy-efficiency and fuel mix can be assessed using PIE-VeV.



## Voorwoord

Dit rapport beschrijft het deelmodel PIE-VeV. PIE-VeV is onderdeel van het Platform voor Integrale Energie- en emissieverkenningen (PIE). Met PIE-VeV kunnen de effecten van ontwikkelingen, beleidsmatig of autonoom, op het energiegebruik en de emissies door de sector verkeer en vervoer worden berekend. Zowel economische als technologische ontwikkelingen kunnen ten opzichte van een referentiescenario (het EC-scenario uit de MV5) worden aangepast.

Het ontwikkelen van het deelmodel heeft plaatsgevonden in nauw overleg met het ECN. Dank is verschuldigd aan Ruud van den Wijngaart (RIVM) en Bert van Wee (RIVM) voor de begeleiding en het commentaar op het voorliggende rapport.

Robert van den Brink  
Paulien Feimann  
september 2002



# Inhoud

<b>SAMENVATTING.....</b>	<b>9</b>
<b>1. INLEIDING.....</b>	<b>11</b>
<b>2. PIE IN RELATIE TOT VERKEER EN VERVOER.....</b>	<b>13</b>
<b>3. MODELBESCHRIJVING PIE-VEV.....</b>	<b>15</b>
3.1 ALGEMENE STRUCTUUR VAN PIE.....	15
3.2 PIE-STRUCTUUR TOEGEPAST OP DE SECTOR VERKEER EN VERVOER.....	9
<b>4. RENDEMENT VAN MOTORTYPE-BRANDSTOFCOMBINATIES IN 1995.....</b>	<b>21</b>
<b>5. ‘VOLUME’.....</b>	<b>23</b>
5.1 INLEIDING.....	23
5.2 BEREKENENINGSWIJZE.....	23
5.3 NETTO BESTEEDBAAR INKOMEN PER HUISHOUDEN.....	24
5.4 ECONOMISCHE GROEI (BBP).....	24
5.5 BRANDSTOFPRIJS.....	25
5.5.1 <i>Personenvervoer</i> .....	26
5.5.2 <i>Goederenvervoer</i> .....	27
<b>6. VERVOERWIJZEKEUZE EN BENUTTING (‘DEMATERIALISATIE’).....</b>	<b>31</b>
6.1 VERVOERWIJZEKEUZE.....	31
6.2 BENUTTING.....	31
<b>7. ENERGIEGEBRUIK PER VOER- OF VAARTUIGKILOMETER (‘BESPARING’).....</b>	<b>33</b>
<b>8. SAMENSTELLING EN RENDEMENT MOTORTYPE- BRANDSTOFCOMBINATIES (‘AANBOD’).....</b>	<b>35</b>
<b>9. ENERGIEGERELATEERDE EMISSIEFACTOREN.....</b>	<b>39</b>
9.1 INLEIDING.....	39
9.2 REFERENTIESCENARIO (EC-SCENARIO MV5).....	39
9.3 CO <sub>2</sub> -EMISSIES.....	39
9.4 OVERIGE EMISSIES (NO <sub>x</sub> , CO, NMVOS, PM <sub>10</sub> ).....	40
9.4.1 <i>Personenauto’s en bestelauto’s (light duty vehicles)</i> .....	40
9.4.2 <i>Vrachtauto’s, trekkers en bussen (heavy duty vehicles)</i> .....	42
9.4.3 <i>Binnenvaart en railvervoer</i> .....	44
<b>10. BRUIKBAARHEID VAN PIE-VEV.....</b>	<b>47</b>
<b>REFERENTIES.....</b>	<b>49</b>
<b>BIJLAGE 1 VERZENDLIJST.....</b>	<b>51</b>
<b>BIJLAGE 2 EMISSIEFACTOREN IN PIE-VEV.....</b>	<b>53</b>





## Samenvatting

Dit rapport beschrijft het deelmodel Verkeer en Vervoer (PIE-VeV) van het Platform voor Integrale Energie- en emissieverkenningen (PIE). PIE is door de doelgroep Energie ontwikkeld in nauwe samenwerking met het ECN en is een integratieplatform dat de grootte en de samenstelling van de vraag naar energiedragers door de verschillende sectoren koppelt aan de energieproductiesector. PIE heeft tot doel de effecten op de nationale emissies van veranderingen in de grootte en de samenstelling van de energievraag door de verschillende sectoren over de gehele energieketen door te kunnen rekenen. Zo heeft bijvoorbeeld een verschuiving van benzine of diesel naar aardgas in de sector verkeer en vervoer niet alleen gevolgen voor de emissies door de sector verkeer en vervoer maar ook voor de emissies door de olieraffinaderijen.

Veranderingen in de energievraag door een sector kunnen het gevolg zijn veel factoren. In PIE is voor een standaardindeling naar vier factoren gekozen, te weten: 1) volumegroei, 2) dematerialisatie, 3) besparing en 4) veranderingen in het aanbod. Het begrip aanbod is afkomstig uit de elektriciteitsproductiesector waar wordt gesproken over het aanbod van elektriciteitscentrales. Hiermee wordt de samenstelling naar type centrale en het rendement bedoeld. ‘Aanbod’ is in de sector verkeer en vervoer gedefinieerd als de samenstelling naar motortype-brandstofcombinatie en het rendement daarvan. Veranderingen in emissies door een sector zijn het gevolg van veranderingen in energievraag en veranderingen in energiegerelateerde emissiefactoren (g/GJ). Het deelmodel Verkeer en Vervoer (PIE-VeV) is onderdeel van PIE. PIE-VeV en beschouwt veranderingen in het energievraag ‘aan de pomp’ en de emissies ter plaatse van het vervoermiddel. In PIE-VeV is, net als in PIE, de toekomstige ontwikkeling in de energievraag door de sector verkeer en vervoer uiteen gerafeld in de vier bovenstaande factoren. Hiertoe is de volgende vertaalslag gemaakt: 1) volumegroei = vervoersomvang in reizigerkilometers of tonkilometers, 2) dematerialisatie = veranderingen in de modal split in het personen- of goederenvervoer en veranderingen in de bezetting/belading van vervoermiddelen, 3) besparing = veranderingen in de energiebehoefte van vervoermiddelen (aan de wielen) en 4) aanbod = samenstelling naar motortype-brandstofcombinatie en de omzettingsrendementen daarvan. Emissies door de sector verkeer en vervoer worden berekend op basis van energievraag aan de pomp en energiegerelateerde emissiefactoren. In deze emissiefactoren zitten impliciet technische maatregelen aan voertuigen en veranderingen in brandstofkwaliteit besloten.

PIE-VeV is geen model dat de absolute vraag naar vervoer in een gegeven scenariocontext kan berekenen en vervangt dus niet de bestaande vervoersmodellen. Met PIE-VeV kunnen wel eerste-ordeschattingen worden gegeven van de effecten op energiegebruik en emissies door de sector verkeer en vervoer van veranderingen ten opzichte van het referentiescenario in enkele economische groeiparameters, modal-shifts in het personen- en goederenvervoer, veranderingen in bezettings- en beladingsgraden, efficiëntieverbeteringen en verschuivingen in de brandstofmix.

De effecten van het veranderen van bovenstaande invoerparameters worden in PIE-VeV weergegeven ten opzichte van een referentiescenario (het EC-scenario uit de Vijfde MilieuVerkenning van het RIVM). De genoemde invoerparameters dienen exogeen door de gebruiker te worden gevarieerd. De gebruiker dient hierbij zelf rekening te houden met eventuele afhankelijkheden tussen invoerparameters. Een toename van bijvoorbeeld de vervoersomvang zal namelijk in bijna alle gevallen ook leiden tot een verandering in de modal split en/of veranderingen in de bezettings- of benuttingsgraden van vervoermiddelen.



# 1 Inleiding

Eind jaren 90 heeft het RIVM besloten om het Reken en Informatie Model (RIM+) als integraal rekeninstrumentarium voor emissieprognoses af te schaffen. Mede omdat dit instrumentarium niet voldoende geschikt is gebleken om vragen van verschillende aard op het gebied van energiegebruik en emissies te beantwoorden streefde het RIVM naar de opbouw van een nieuw integraal instrumentarium om een koppeling te leggen tussen de energieproductiesector en de energieconsumerende sectoren. Binnen ECN leefde tegelijkertijd de wens om haar instrumentarium slagvaardiger en toegankelijker te maken, waardoor de flexibiliteit en de snelheid waarmee globale resultaten verkregen kunnen worden toeneemt. Dit betekent dat ook andere medewerkers dan de modelexperts de modellen moeten kunnen draaien en op hoofdlijnen analyses moeten kunnen doen. Omdat het RIVM en ECN een grote overlap hebben op het terrein van energie en emissies werkten zij gezamenlijk aan de ontwikkeling en het gebruik van het Platform voor Integrale Energie- en emissieverkenningen (PIE). Met behulp van PIE kunnen bepaalde beleidsvragen flexibeler, sneller en inzichtelijker worden beantwoord.

PIE is zoals eerder aangegeven een integrerend platform waaraan verschillende deelmodellen worden gekoppeld. Eén die modellen is het deelmodel Verkeer en Vervoer (PIE-VeV). Deze rapportage beschrijft PIE-VeV. Ten tijde van het afronden van dit rapport (september 2002) was de koppeling van PIE-VeV aan PIE nog niet gerealiseerd. Dit rapport gaat daarom niet in op de wijze waarop het deelmodel PIE-VeV aan PIE is gekoppeld. Het doel van dit rapport is het beschrijven van het deelmodel Verkeer en Vervoer en het vastleggen van de in PIE-VeV gebruikte invoergegevens. Hoofdstuk 2 gaat in op de achtergrond en het doel van PIE. Hoofdstuk 3 geeft een algemene beschrijving de structuur van PIE en van PIE-VeV. Hoofdstuk 4 tot en met 7 geven een beschrijving per onderdeel.



## 2 PIE in relatie tot verkeer en vervoer

PIE is een instrumentarium dat de koppeling legt tussen energievraag in Nederland en energieproductie. Deze koppeling is noodzakelijk om de effecten op de nationale emissies ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$ , VOS en  $\text{PM}_{10}$ ) door te kunnen rekenen van veranderingen in de grootte en samenstelling van de energievraag in de verschillende sectoren. PIE heeft tot doel beleidsvragen op hoofdlijnen te kunnen beantwoorden. Deze paragraaf gaat alleen in op de beleidsvragen op het gebied van verkeer en vervoer die met PIE (waarin PIE-VeV) beantwoord kunnen worden. Voor de beleidsvragen op andere terreinen dan verkeer en vervoer die met PIE kunnen worden beantwoord wordt verwezen naar ECN/RIVM (2000).

Met PIE kunnen de effecten op emissies aan de energie-aanbodzijde (bijv. raffinaderijen en elektriciteitscentrales) worden berekend die het gevolg zijn van veranderingen in de vraag naar de verschillende energiedragers door de sector verkeer en vervoer. Het effect op emissies van bijvoorbeeld een verschuiving van benzine/diesel in verbrandingsmotoren naar waterstof in brandstofcellen beperkt zich niet tot de sector verkeer en vervoer: in plaats van de raffinage van motorbrandstoffen uit aardolie wordt waterstof geproduceerd hetgeen met andere emissies gepaard gaat dan de raffinage van aardolieproducten. Dit integrale aspect van PIE is met name van belang voor broeikasgassen (o.a.  $\text{CO}_2$ ) en emissiecomponenten die bijdragen aan grootschalige luchtverontreiniging ( $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$ , VOS en fijn stof).

Enkele beleidsvragen op het terrein van verkeer en vervoer die met PIE kunnen worden beantwoord zijn:

- wat is het effect op energiegebruik en emissies van een verandering in economische groei (alle sectoren)?
- wat is het effect op energiegebruik en emissies van veranderingen in de vervoerwijzekeuze (modal split)?
- wat is het effect op energiegebruik en emissies van een verhoging van de bezettingsgraad van vervoermiddelen?
- wat is het effect op energiegebruik en emissies van een verlaging van het specifiek brandstofverbruik van vervoermiddelen?
- wat is het effect op energiegebruik en emissies van de inzet van alternatieve brandstoffen en alternatieve voertuigtechnologieën?



## 3 Modelbeschrijving PIE-VeV

### 3.1 Algemene structuur van PIE

In PIE en daarmee ook in PIE-VeV worden de zowel de begrippen ‘nuttige warmte’ en ‘finale energie’ gebruikt. Het begrip ‘nuttige warmte’ staat voor de energie die nodig is om een proces te laten plaatsvinden. Gedacht moet worden aan de energie in de vorm van warmte die nodig is om een liter water aan de kook te krijgen. Bij de opwekking van deze hoeveelheid warmte gaat in het algemeen energie verloren. In het geval van bijvoorbeeld het koken van een liter water op een elektrisch kooktoestel is meer energie in de vorm van elektriciteit nodig dan de hoeveelheid warmte-energie die is opgeslagen in het kokende water. Bovendien gaat de opwekking van elektriciteit uit bijvoorbeeld aardgas of kolen gepaard met energieverliezen. Tussen ‘finale energie’ en ‘nuttige warmte’ zit het rendement van de energieomzetting.

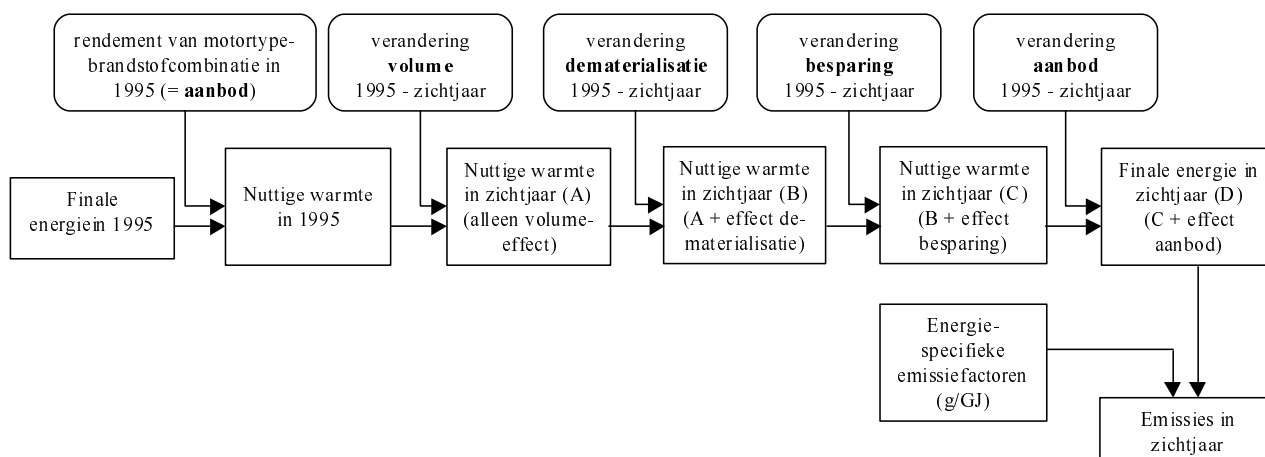
Binnen de sector verkeer en vervoer is ‘nuttige warmte’ gedefinieerd als benodigde aandrijfenergie om een vervoermiddel een bepaalde afstand in een bepaalde tijd te laten overbruggen. Het begrip ‘finale energie’ is gedefinieerd als de energie-inhoud van de daarvoor benodigde brandstof (aan de pomp). De mechanische aandrijfenergie die aan de wielen van het voertuig nodig is om een kilometer te rijden moet worden opgewekt in een verbrandingsmotor of in sommige gevallen in een elektromotor. Deze verbrandingsmotor gebruikt aanzienlijk meer energie (in de vorm van brandstof) dan dat het levert in de vorm van mechanische energie aan de wielen.

In PIE worden veranderingen in de energievraag door sectoren verklaard door vier factoren, te weten:

- 1) **volume**: ontwikkeling van een economische indicator voor de groei van de sector;
- 2) **dematerialisatie + structureffect**: verschil tussen economische indicator voor de groei van een sector en de fysieke indicator voor die groei + veranderingen in de structuur van een sector;
- 3) **besparing**: vermindering in de vraag naar ‘nuttige warmte’ per eenheid van de fysieke indicator;
- 4) **aanbod**: veranderingen in de samenstelling naar energie-omzetters en het rendement van de energie-omzetters (van ‘finale energie’ naar ‘nuttige warmte’).

In PIE is ervoor gekozen het finale energiegebruik van een sector in het basisjaar 1995 allereerst om te rekenen naar ‘nuttige warmte’ via het gemiddelde rendement van de energie-omzetters in 1995. Vervolgens wordt de hoeveelheid ‘nuttige warmte’ berekend door alleen rekening te houden met volumegroei, daarna wordt het effect van dematerialisatie meegenomen en vervolgens het effect van besparing. Als laatste wordt de op die manier verkregen toekomstige ontwikkeling van de nuttige vraag via de gemiddelde rendementen in de zichtjaren omgerekend naar de ontwikkeling van de vraag naar ‘finale energie’ door de sector.

Veranderingen in emissies door een sector zijn het gevolg van veranderingen in energievraag en veranderingen in energiegerelateerde emissiefactoren (g/GJ). Figuur 1 geeft schematisch de modelstructuur. Voor de beweegredenen achter de modelstructuur wordt verwezen naar ECN/RIVM (2000).



Figuur 1: Structuur van PIE

### 3.2 PIE-structuur toegepast op de sector verkeer en vervoer

Om de ontwikkelingen in sectoren te kunnen vergelijken moet het deelmodel Verkeer en Vervoer (PIE-VeV) qua structuur aansluiten op de bovenstaande structuur van PIE. In PIE is de sector verkeer en vervoer onderverdeeld in twee subsectoren: personen- en goederenvervoer. In PIE-VeV moesten daarom, net als in PIE, de toekomstige ontwikkelingen in de energievraag door het personenvervoer en het goederenvervoer uiteen worden gerafeld in de vier bovenstaande factoren. Daartoe zijn de volgende keuzes gemaakt:

#### Economische indicator voor de de groei van de sector ('volume')

Als economische indicator voor de groei van de sector verkeer is de totale vervoersomvang gebruikt, ofwel het totaal aantal reizigerkilometers in het personenvervoer en het totaal aantal tonkilometers in het goederenvervoer.

#### Fysieke indicator voor de de groei van de sector

Als fysieke indicator is het aantal voertuig- of vaartuigkilometers gehanteerd.

#### Dematerialisatie

Het begrip dematerialisatie is voor het personenvervoer daarmee gelijk aan het verschil in ontwikkeling van reizigerkilometers en voertuig- of vaartuigkilometers, ofwel de veranderingen in de gemiddelde bezetting (aantal reizigers) van vervoermiddelen. De verandering in de bezetting van voertuigen is weer het gevolg van en veranderingen in de capaciteit van voer- en vaartuigen en/of veranderingen in de bezettingsgraad (in procenten van de maximale bezetting). In PIE-VeV kan alleen de gemiddelde bezetting/belading worden gevarieerd. In het goederenvervoer is de dematerialisatie gelijk aan de verandering van de gemiddelde belading van vervoermiddelen. Veranderingen in de gemiddelde belading kunnen het gevolg zijn van veranderingen in het maximale laadvermogen van vervoermiddelen en/of veranderingen in de beladingsgraad.

#### Structuureffect

Voor de sector verkeer en vervoer is een verschuiving in de modal split een structuureffect. De modal split is het aandeel van de verschillende vervoerwijzen in het personen- of goederenvervoer. In PIE-VeV kan geen onderscheid worden aangebracht tussen structuureffect en dematerialisatie en worden beide samengevoegd.

#### Nuttige warmte

De 'nuttige warmte' is gedefinieerd als de hoeveelheid aandrijfenergie aan de wielen van een wegvoertuig of trein of aan de schroef van een vaartuig.



### Besparing

Besparing is gedefinieerd als een vermindering van de hoeveelheid nuttige warmte per eenheid van de fysieke indicator. Voor PIE-VeV betekent dit: de vermindering van de benodigde hoeveelheid aandrijfenergie per voer- of vaartuigkilometer. Besparing kan in de sector verkeer optreden als de stroomlijning van voertuigen verbetert of de rolweerstand van banden afneemt.

### Aanbod van motortype-brandstofcombinaties

‘Nuttige warmte’, ofwel aandrijfenergie, wordt in de sector verkeer en vervoer geleverd door verbrandingsmotoren of elektromotoren. Binnen verbrandingsmotoren zijn verschillende typen vertegenwoordigd zoals de Ottomotor en de Dieselmotor. Beide typen motoren kunnen bovendien van directe en indirecte brandstofinspuiting zijn voorzien. Het rendement van dieselmotoren is in het algemeen hoger dan dat van Ottomotoren, het rendement van direct ingespoten motoren is het algemeen hoger dan van indirect ingespoten motoren. Het gebruik van LPG in een Ottomotor leidt in principe tot een ander motorrendement dan het gebruik van benzine in een Ottomotor.

Hybridisatie van aandrijflijnen (gebruik van twee krachtbronnen) leidt tot een daling van het brandstofverbruik doordat: 1) de verbrandingsmotor min of meer stationair kan draaien in een zo efficiënt mogelijk toerental-belastingspunt en 2) remenergie kan worden teruggewonnen met behulp van de elektromotor. De eerste oorzaak voor de daling van het brandstofverbruik moet eigenlijk worden toegerekend aan de factor ‘aanbod’ (verbetering van het rendement), de tweede oorzaak is eigenlijk een besparing: het voertuig heeft per saldo immers minder aandrijfenergie nodig omdat het energie terugwint. Omdat geen gegevens beschikbaar zijn over het aandeel van beide oorzaken in het totale effect van hybridisatie, is het effect hybridisatie volledig toegerekend de factor ‘aanbod’.

PIE-VeV beschouwt dus veranderingen in het energievraag door de sector ‘aan de pomp’ en de emissies ter plaatse van het vervoermiddel. Energiegebruik ten behoeve van de productie van motorbrandstoffen en de eventueel daarbij optredende emissies vallen in PIE onder de sector raffinaderijen.

Emissies door de sector verkeer en vervoer worden berekend op basis van energievraag aan de pomp (‘finale energie’) en energiegerelateerde emissiefactoren. In deze emissiefactoren liggen impliciet technische maatregelen aan voertuigen en veranderingen in de brandstofkwaliteit besloten. De emissiefactoren zijn afgeleid door de in de MV5 berekende emissies te delen door het energiegebruik. Deze wijze van berekening van emissies zoals toegepast in PIE is niet gebruikelijk bij de berekening van emissies door wegvoertuigen omdat:

1. in het geval van lichte wegvoertuigen (personen- en bestelauto’s) meestal alleen informatie beschikbaar is over de emissies per voertuigkilometer en niet de emissies per liter brandstofverbruik;
2. gedetailleerde gegevens over het totale energiegebruik van een bepaalde categorie voertuigen niet voorhande zijn maar moeten worden berekend op basis van aantallen voertuigkilometers en specifiek energiegebruik (MJ/km).

Het eerste wordt veroorzaakt doordat de Europese Unie voor lichte wegvoertuigen de emissies per gereden kilometer normeert, ongeacht het brandstofverbruik. Dit leidt tot het contra-intuïtieve gegeven dat grote personenauto’s lagere energiegerelateerde emissiefactoren (g/GJ) hebben dan kleinere auto’s.

In PIE-VeV kunnen de factoren ‘volume’, ‘dematerialisatie’, ‘besparing’ en ‘aanbod’ onafhankelijk van elkaar worden gevarieerd. In de praktijk zijn deze factoren echter niet onafhankelijk. Een voorbeeld is het totale vervoersvolume in personen- of goederenvervoer en de modal split (onderdeel van de factor ‘dematerialisatie’). Het vervoersvolume kan in PIE-VeV worden gevarieerd terwijl de modal split constant blijft. Dit veronderstelt impliciet perfect overlappende markten voor de diverse vervoerwijzen. Die perfecte overlap is er in werkelijkheid niet. Zo overlappen de markten voor autogebruik en openbaarvervoer gebruik elkaar slechts in beperkte mate (Bovy et al., 1990). Maatregelen die het autogebruik onaantrekkelijk maken, leiden daarom primair tot een afname van het autogebruik; deze afname komt maar voor een klein deel terug in de vorm van een toename van het gebruik van de andere vervoerwijzen. Omgekeerd leidt het aantrekkelijker maken van de trein primair tot meer treingebruik; de afname van het autogebruik is beperkt. Ook in het goederenvervoer is er geen sprake van perfect overlappende markten. Als bijvoorbeeld het vervoer van ruwe olie per zeeschip niet meer mogelijk zou zijn, zal die olie niet met het vliegtuig vervoerd worden. De wijze van modelleren van PIE-VeV heeft tot gevolg dat een inhoudelijke concessie is gedaan ten behoeve van de consistentie met andere sectoren in PIE.

#### Vervoerwijzen binnen personen- en goederenvervoer

Transport valt binnen PIE uiteen in twee deelsectoren namelijk personenvervoer en goederenvervoer. Onder personenvervoer worden verstaan: personenauto's, motoren, bromfietsen, bussen, personentreinen, recreatievaart en luchtvaart. Onder goederenvervoer worden verstaan: bestelauto's, vrachtauto's, trekkers, speciale voertuigen, goederentreinen, binnenvaart, zeescheepvaart en mobiele werktuigen.

De ‘uiteenrafeling’ van de ontwikkeling in ‘finale energievraag’ naar de factoren ‘volume’, ‘dematerialisatie’, ‘besparing’ en ‘aanbod’ is in PIE-VeV in principe alleen uitgevoerd voor vervoerwijzen die op Nederlands grondgebied rijden en varen. De in PIE-VeV gehanteerde energiegebruiks- en emissiecijfers hebben immers ook betrekking op het Nederlandse grondgebied. Eén van de onderdelen van ‘dematerialisatie’ is de toekomstige verandering in de aandelen van vervoerwijzen in het personen- en goederenvervoer op Nederlands grondgebied, uitgedrukt in percentage van de totale hoeveelheid reizigerkilometers of tonkilometers. Voor luchtvaart, zeescheepvaart, recreatievaart, mobiele werktuigen en speciale (weg)voertuigen is de hoeveelheid reiziger- of tonkilometers op Nederlands grondgebied om verschillende redenen niet te bepalen. Voor deze vervoerwijzen is de ontwikkeling van het finale energiegebruik exogeen in PIE-VeV ingevoerd en kunnen de factoren ‘dematerialisatie’, ‘besparing’ en ‘aanbod’ dus niet worden gewijzigd. Het is wel mogelijk de factor ‘volume’ te wijzigen door de economische ontwikkeling te variëren (zie hoofdstuk 5).

#### Zichtjaren

Zichtjaren in PIE-VeV zijn 2010, 2020 en 2030. Basisjaar van de bestaande scenario's is 1995. PIE bevat ook de zichtjaren 2005, 2015 en 2025, deze tussenliggende jaren zijn in PIE-VeV niet beschikbaar.

#### Emissiecomponenten

PIE beschouwt de emissiecomponenten CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, VOS en fijn stof (PM<sub>10</sub>).

### Energiedragers

PIE maakt voor wat betreft het finale energiegebruik door sectoren onderscheid naar de volgende:

- kolen,
- olie,
- aardgas,
- elektriciteit,
- duurzaam (zoals windenergie, zonne-energie en biomassa) en
- overige, onderverdeeld in:
  - o warmtelevering,
  - o waterstof,
  - o ethanol/methanol,
  - o uranium en
  - o afval.

Elektriciteit, warmtelevering, waterstof en ethanol/methanol zijn secundaire energiedragers die worden geproduceerd uit een van de primaire energiedragers (o.a. kolen, olie, aardgas, duurzaam, uranium en afval).

De sector verkeer en vervoer maakt anno 2002 alleen gebruik van uit olie vervaardigde brandstoffen (benzine, diesel, LPG), aardgas en elektriciteit.



## 4 Rendement van motortype-brandstofcombinaties in 1995

De eerste stap in PIE is de vertaling van finale energievraag naar nuttige vraag in het basisjaar 1995. In termen van verkeer en vervoer komt de finale energievraag overeen met de vraag naar brandstoffen aan de pomp. De nuttige vraag komt overeen met de door de krachtbron (elektromotor, verbrandingsmotor, straalmotor) geleverde energie ofwel de aandrijfenergie die aan de wielen van een voertuig of aan de schroef van een vaartuig beschikbaar komt. Het verschil tussen de energievraag aan de krachtbron (nuttige vraag) en de energie die de krachtbron nodig heeft (energievraag) wordt het motorrendement genoemd. Het rendement van de aandrijflijn (tussen uitgaande as van de motor en de wielen/schroef) wordt in PIE-VeV buiten beschouwing gelaten omdat dit rendement de 100% benadert. Tabel 1 geeft de door het RIVM geschatte waarden voor de motorrendementen in 1995.

Tabel 1: Geschat rendement van verschillende in PIE-VeV onderscheiden motortype-brandstofcombinaties (energie-omzetter)

personenvervoer			goederenvervoer		
categorie	energie-omzetter	rendement	categorie	energie-omzetter	rendement
personenauto	Ottomotor benzine	31%	bestelauto benzine	Ottomotor benzine	31%
personenauto	Dieselmotor diesel	40%	bestelauto diesel	Dieselmotor diesel	40%
personenauto	Ottomotor LPG	31%	bestelauto LPG	Ottomotor LPG	31%
motor- + bromfiets	Ottomotor benzine	31%	vrachtauto + trekker	Dieselmotor diesel	40%
autobus	Dieselmotor diesel	40%	binnenvaart	Dieselmotor diesel	40%
railvervoer	Elektromotor	87%	railvervoer elektrisch	Elektromotor	87%
railvervoer	Dieselmotor diesel	30%	railvervoer diesel	Dieselmotor diesel	30%
recreatievaart	Ottomotor benzine	25%	speciale voertuigen	Ottomotor	35%
luchtvaart	Turbine kerosine	25%	zeescheepvaart	Dieselmotor diesel	45%
			mobiele werktuigen	Dieselmotor diesel	40%

bronnen: Pischinger (1998), Gijsen en Van den Brink (2002)

Met hulp van de rendementen uit Tabel 1 wordt de energievraag in het basisjaar 1995 omgezet in de nuttige energievraag in 1995.

De precieze waarde van rendementen in Tabel 1 is voor PIE-VeV eigenlijk niet zo erg belangrijk. In de laatste rekenstap ‘aanbod’ wordt de nuttige vraag namelijk weer omgerekend in finale energie aan de hand van dezelfde rendementen als in Tabel 1. De reden hiervoor is dat toekomstige verbetering van de brandstofefficiency het gevolg zijn van verbeteringen in het motorrendement maar ook van een verlaging van de benodigde aandrijfenergie doordat voertuigen bijvoorbeeld lichter worden of de luchtweerstand wordt verlaagd. Het is aan de hand van het bestaande cijfermateriaal niet mogelijk de in de MV5 verwachte verlaging van de brandstofverbruik toe te delen beide verbeteringen. Daarom is in PIE-VeV besloten het totale effect toe te rekenen aan een verlaging van de benodigde aandrijfenergie (‘besparing’) en het motorrendement constant te houden. Verschillen in rendementen tussen de krachtbronnen in Tabel 1 zijn wel van belang omdat het toekomstige aanbod (samenstelling van krachtbronnen) kan verschillen van die in 1995.



## 5 ‘Volume’

### 5.1 Inleiding

In PIE-VeV wordt in de rekenstap ‘volume’ de vraag naar nuttige warmte berekend waarbij alleen rekening wordt gehouden met de toename van de totale vervoersomvang. Het effect van ‘dematerialisatie’, ‘besparing’ en ‘aanbod’ worden in deze rekenstap nog buiten beschouwing gelaten. Als indicator voor het volume van de sector verkeer en vervoer is het totaal aantal reizigerskilometers en het aantal tonkilometers gekozen voor respectievelijk het personen- en het goederenvervoer. PIE-VeV rekent default met de toename van het aantal reizigerkilometers en tonkilometers uit het EC-scenario van de MV5. Aan deze groei van het vervoersvolume ligt een bepaalde economische ontwikkeling ten grondslag (zie RIVM, 2000). De gebruiker van PIE-VeV kan deze economische ontwikkeling variëren door aan de volgende macro-economische indicatoren te ‘draaien’:

- economische groei (BBP);
- netto besteedbaar inkomen per huishouden;
- brandstofprijzen.

Het BBP wordt verondersteld alleen het goederenvervoer te beïnvloeden, het netto besteedbaar inkomen per huishouden alleen het personenvervoer en de brandstofprijzen beide. De precieze afhankelijkheid van deze economische indicatoren is echter afhankelijk van de vervoerwijze in kwestie. Voor iedere vervoerwijze is aan de hand van de literatuur bepaald in welke mate het volume afhankelijk is van bovenstaande economische indicatoren.

### 5.2 Berekeningswijze

Om wijzigingen in de vraag naar toekomstig vervoer ten opzichte van het referentiescenario te berekenen zijn het netto besteedbaar inkomensniveau, de economische groei en de prijs van vervoer van belang. De prijs van vervoer is voor het beleid een belangrijk aangrijpingspunt om het vervoersvolume te beperken, de vervoerwijzekeuze te beïnvloeden en om de toepassing van energie-efficiënte of schonere technieken en zuiniger rijgerag te stimuleren.

De invloed van veranderingen in de vervoerprijs op de vraag naar vervoer (uitgedrukt in reizigerskilometers of tonkilometers) wordt vaak uitgedrukt in elasticiteiten. Een elasticiteit duidt de relatieve verandering van de ene variabele  $X$  in verhouding tot die van een andere variabele  $Y$  aan  $[(dY/Y)/(dX/X)]$ . De  $Y$  is hierbij de onafhankelijk variabele, de  $X$  de afhankelijke variabele. Hierbij wordt verondersteld dat alle andere invloedsfactoren constant blijven (De Wit en Van Gent, 1995). Een brandstofprijselasticiteit van de vraag naar personenautokilometers van  $-0,3$  geeft bijvoorbeeld aan dat een brandstofprijsverhoging van 10% resulteert in een vermindering van het aantal personenautokilometers met 3%. De in de literatuur gevonden elasticiteiten liggen binnen een relatief grote bandbreedte. Deze bandbreedte wordt voor het grootste deel verklaard door:

De termijn waarop het onderzoek heeft plaatsgevonden. Lange-termijn effecten zijn in theorie groter dan de korte-termijn effecten omdat op de korte termijn meer keuzen vast liggen. Op lange termijn blijken mensen bijvoorbeeld dichter bij hun werk te gaan wonen of dichter bij huis te gaan werken (Geurs en Van Wee, 1997). In de literatuur wordt vaak onvoldoende onderscheid gemaakt naar de termijn waarop de elasticiteiten betrekking hebben. Voor het PIE model wordt gelet op de zichtperiode (tot 2020) gekozen voor lange termijn elasticiteiten (10-20 jaar).

De context van het onderzoek. Aangezien elasticiteiten de relatieve verandering weergegeven is het basisniveau van belang. Zo zullen de effecten van prijsverhogingen

op het autogebruik en brandstofverbruik bij een hoger inkomensniveau kleiner zijn dan bij een lager inkomensniveau. Huishoudens met hogere inkomens zijn namelijk minder prijsgevoelig dan huishoudens met lage inkomens. Verder kan bij hogere prijsniveaus een extra versterkend effect optreden waardoor gerekend zou moeten worden met hogere elasticiteiten. Uit onderzoek van Muconsult (1997) blijkt dat de elasticiteiten bij 1-10% hogere prijsniveaus overeenkomen met de inzichten in de literatuur maar bij prijsniveaus boven de 10% de elasticiteiten (fors) hoger liggen. Bij grotere prijsveranderingen dan 10% dient de gebruiker de elasticiteiten aan te passen.

### **5.3 Netto besteedbaar inkomen per huishouden**

Het autobezit, -gebruik en het brandstofverbruik zijn afhankelijk van het inkomensniveau van huishoudens. Inventarisatie van empirisch en modelmatig vastgestelde inkomenselasticiteiten geeft een grote bandbreedte voor het effect van inkomen op autobezit, -gebruik en brandstofverbruik. De inkomenselasticiteit van de vraag naar autobezit en -gebruik blijkt sterk inkomensafhankelijk. De relatie tussen inkomen per capita en autobezit per capita is S-vormig dat wil zeggen, extra inkomen leidt bij lagere startniveaus tot een meer dan evenredige toename van het autobezit, maar bij hogere inkomens tot een minder dan evenredige toename. In landen met relatief lage inkomens ligt de inkomenselasticiteit van het autobezit op circa +2,0, in landen met hogere inkomens, met een al vrijwel verzadigd niveau van autobezit op vrijwel 0 (Dargay en Gately, 1999). Voor Nederland anno 1992 geven Dargay en Gately (1998) een inkomenselasticiteit van +0,73. In 2020 ligt het autobezit in Nederland duidelijk rechts van het buigpunt in de S-curve. In verband hiermee is een inkomenselasticiteit van het autobezit en -gebruik verondersteld van +0,35.

In de literatuur is geen informatie gevonden over inkomenselasticiteit van motor- en bromfietsgebruik. Aangenomen is dat de inkomenselasticiteit overeenkomt met die van personenautogebruik.

### **5.4 Economische groei (BBP)**

Extra economische groei leidt in het algemeen tot extra goederenvervoer (in tonkilometers). De relatie economische groei => goederenvervoer (elasticiteit) is voor de verschillende modaliteiten in het goederenvervoer afgeleid uit de verschillen tussen 2010 en 2020 van het BBP en het vervoersvolume voor het DE-, EC- en GC-scenario van de MV4 (Geurs et al., 1998). Tabel 2 geeft het BBP in alle drie de scenario's voor 2010 en 2020 ten opzichte van het basisjaar 1995 evenals de vervoersomvang. In PIE-VeV is de gemiddelde waarde uit de rechter kolom van Tabel 2 gebruikt.



Tabel 2: Ontwikkeling BBP en vervoersomvang tussen 1995 en 2020 en de daaruit berekende BBP-elasticiteit voor de vraag naar goederenvervoer

	index: 1995 = 100	DE	DE	EC	EC	GC	GC	BBP-elasticiteit <sup>b)</sup>	
		2010	2020	2010	2020	2010	2020	range	gemiddeld
BBP		125	145	150	197	162	222		
bestelauto's (tonkm)		138	164	168	235	184	280	1,2 – 1,4	1,3
vrachtoertuigen <sup>a)</sup> (tonkm)		148	179	188	273	207	331	1,3 – 1,6	1,4
binnenvaart (tonkm)		106	104	111	116	112	115	-0,1 – 0,1	0,0
goederentreinen (tonkm)		164	178	211	276	220	321	0,5 – 1,2	0,9
bestelauto's, vrachtoertuigen, binnenvaart en goederentreinen (tonkm)		134	154	163	220	175	257	0,9 – 1,2	1,1
mobiele werktuigen (uren)		103	109	113	126	113	130	0,4 – 0,4	0,4 <sup>c)</sup>
zeescheepvaart (tonkm)		115	120	133	152	144	180	0,3 – 0,7	0,5 <sup>c)</sup>

a) vrachtauto's en trekkers

b) De gemiddelde BBP-elasticiteit is berekend door voor de drie scenario's (EC, GC en DE) het procentuele verschil in het vervoersvolume tussen 2010 en 2020 te delen door het procentuele verschil in BBP. Deze drie waarden zijn gemiddeld.

c) BBP-elasticiteit voor de vraag naar finaal energiegebruik door deze modaliteiten wordt gelijk verondersteld aan de BBP-elasticiteit voor de vraag naar goederenvervoer.

bron: Geurs et al. (1998)

Mobiele werktuigen en zeescheepvaart passen niet in het PIE-stramien (zie hoofdstuk 3). Voor deze vervoerwijzen is in PIE de ontwikkeling van het finaal energiegebruik exogeen ingevoerd. Wel wordt het energiegebruik door deze vervoerwijzen afhankelijk verondersteld van het BBP middels de elasticiteiten uit Tabel 2.

Uit Tabel 2 wordt duidelijk dat een toename van het BPP niet alleen leidt tot een toename van het totale goederenvervoer maar ook tot een modal shift naar het wegvervoer omdat de BBP-elasticiteit voor vrachtoertuigen en bestelauto's hoger is dan voor goederentreinen en binnenvaart. De structuur van PIE-VeV vraagt echter om een inschatting het effect op het totale goederenvervoer als gevolg van een verandering van het BBP. De modal split is in PIE-VeV een onafhankelijke factor die desgewenst door de gebruiker kan worden gewijzigd. Hiermee wordt direct een onvolkomenheid van PIE-VeV duidelijk. Wanneer de gebruiker namelijk draait aan de BBP-knop moet de gebruiker eigenlijk ook de modal split veranderen. Het is niet mogelijk de modal split automatisch te laten veranderen bij een verandering van het BBP omdat de modal split ook exogeen door de gebruiker moet kunnen worden gewijzigd.

## 5.5 Brandstofprijzen

Een verhoging van de brandstofprijzen komt als eerste aan bij de vervoerder (zowel goederen als personen). De stijging van de brandstofprijs zal worden doorberekend in de prijs van vervoer, de mate waarin is afhankelijk van:

- maatregelen die door de vervoerder worden genomen om het brandstofverbruik per voertuigkilometer te verminderen (bij voorbeeld eerdere afschrijving oudere voertuigen, aanpassing rijgedrag, grotere aandacht voor brandstofverbruik bij de aanschaf van voertuigen en de rijopleiding van chauffeurs) ('besparing' in PIE-VeV).
- de inspanningen van de vervoerder om de beladings- of bezettinggraad te vergroten ('dematerialisatie' in PIE-VeV).
- modal shift naar goedkopere vervoermiddelen ('dematerialisatie' in PIE-VeV).

De resterende prijsverhoging per reiziger- of tonkilometer zal leiden tot vraaguitval ofwel een afname van het personenvervoer respectievelijk goederenvervoer.

In PIE-VeV is gebruikt gemaakt van literatuurgegevens over het effect van brandstofprijzveranderingen op de hoeveelheid vervoer. Hierbij dient onderscheid te worden gemaakt naar verschillende vervoerwijzen binnen personen- en goederenvervoer omdat het aandeel van de brandstofkosten in de totale vervoerskosten per modaliteit verschillend is.

Er zijn vele vormen van prijsbeleid denkbaar. Deze zijn onder te verdelen in prijsbeleid gericht op vaste kosten (bijvoorbeeld verhogen van de motorrijtuigenbelasting), op variabele kosten (bijvoorbeeld accijnsverhoging) en variabilisatie van de kosten (door bijvoorbeeld een kilometerheffing in te voeren). In de toekomst zal naar verwachting worden aangestuurd op variabilisatie van de autokosten. Met andere woorden het autobezit wordt goedkoper terwijl het autorijden per kilometer duurder wordt. Niet al deze vormen van prijsbeleid kunnen met behulp van PIE-VeV worden berekend. Alleen prijsbeleid dat van invloed is op de variabele kosten kan worden doorgerekend door de brandstofprijz te variëren. Het effect van een kilometerheffing kan met PIE-VeV dus niet worden doorgerekend omdat tegelijkertijd de vaste kosten worden verlaagd.

### **5.5.1 Personenvervoer**

#### Personenauto's

Het verhogen van de brandstofprijz vanuit de markttechnische redenen of als beleidsmaatregel kent een effect op het autobezit, -gebruik, brandstofverbruik, bezettingsgraad en vervoerswijzekeuze in het personenvervoer. Alleen het effect op autogebruik (vraaguitval bij hogere brandstofprijz, vraaggeneratie bij lagere brandstofprijz) worden onder 'volume' meegenomen. De overige effecten van brandstofprijzveranderingen, zoals verandering van het brandstofverbruik van personenauto's, kunnen in PIE-VeV exogeen ingevuld worden onder 'besparing'.

Een groot aantal studies heeft zich bezig gehouden met brandstofprijzelasticiteiten; zie voor een overzicht Geurs en Van Wee (1997). Op basis van de Nederlandse en internationale studies komen zij tot een divers beeld van de te verwachten effecten van brandstofheffingen op het autobezit, -gebruik en brandstofverbruik. De range voor het autogebruik varieert van – 0,1 tot –0,3. In PIE-VeV is gebruik gemaakt van een brandstofprijzelasticiteit voor de vraag naar personenautokilometers van –0,2. Verondersteld is dat de bezettingsgraad niet wijzigt bij een verandering van de brandstofprijzen en dus dat de elasticiteit van –0,2 ook geldt voor de vraag naar reizigerkilometers per personenauto.

#### Motoren en bromfietsen

In de literatuur is geen informatie gevonden over brandstofprijzelasticiteiten van motoren en bromfietsen. Aangenomen is dat de elasticiteiten overeenkomen met die van personenauto's.

#### Autobussen - OV

Volgens Geurs en van Wee (1997) neemt het openbaar-busgebruik op lange termijn met 0,65% toe bij iedere procent verlaging van het bustarief. Om de brandstofprijzelasticiteit voor de vraag naar reizigerkilometers per OV-bus te kunnen berekenen, moet het aandeel van de brandstofkosten in het bustarief worden ingeschat. Uitgaande van een energiegebruik per reizigerkilometer van circa 1,5 MJ per reizigerkilometer (Van den Brink en Van Wee, 1997), een energie-inhoud van 36 MJ per liter diesel en een dieselprijz van € 0,8/liter bedragen de brandstofkosten in het openbaar-busvervoer dus € 0,03 per reizigerkilometer. Het tarief van OV-busvervoer is afgeleid op basis van de OV-reisplanner ([www.9292ov.nl](http://www.9292ov.nl)). De gemiddelde

verplaatsing per bus/tram/metro is volgens het OVG circa 14 kilometer, voor deze verplaatsing zijn in het streekbusvervoer circa 4 tot 5 strippen nodig hetgeen € 2,00 tot € 2,50 kost. Het tarief per kilometer komt daarmee op € 0,15 tot € 0,18. De kosten voor diesel maken daarmee 15-20% uit van het gemiddelde OV-bustarief. De brandstofprijselasticiteit komt daarmee afgerond op circa -0,1.

### Personentreinen

Volgens Geurs en van Wee (1997) neemt het treingebruk op lange termijn met 1% toe bij iedere procent verlaging van het treintarief. Om de brandstofprijselasticiteit voor de vraag naar reizigerkilometers per trein te kunnen berekenen, moet het aandeel van de brandstofkosten in het treintarief worden ingeschat. Op basis van NS (2000) kan worden afgeleid dat de NS in 1999 236 miljoen gulden (€ 107 mln) heeft uitgegeven aan 'energieverbruik'. Volgens NOVEM (2002) heeft NS-Reizigers een aandeel van circa 85% in het totale energiegebruik door de NS. De opbrengsten uit reizigervervoer bedroegen in 1999 2.820 miljoen gulden (€ 1280 mln). De kosten voor elektriciteit/diesel maken daarmee slechts 7% uit van het gemiddelde treintarief. De brandstofprijselasticiteit komt daarmee op -0,07, afgerond op één decimaal is dit -0,1.

### Luchtvaart

De brandstofprijselasticiteit in de luchtvaart is gebaseerd op een literatuurstudie door CE (Hoff et al., 2002). Hoff et al. geven een brandstofprijselasticiteit voor de vraag naar brandstof van -0,2 tot -0,4. In PIE-VeV is verondersteld dat de middenwaarde (-0,3) ook geldt voor het energiegebruik door de luchtvaart tijdens Landing-and-Take-Off (LTO).

*Tabel 3: Brandstofprijselasticiteiten voor de vraag naar personenvervoer*

modaliteit	brandstofprijselasticiteit	voor de vraag naar:
personenauto's	-0,2	voertuigkilometers
motoren en bromfietsen	-0,2	voertuigkilometers
autobussen	-0,1	reizigerkilometers
personentreinen	-0,1	reizigerkilometers
luchtvaart	-0,3	finaal energiegebruik
recreatievaart	onbekend	finaal energiegebruik

De ontwikkeling van het energiegebruik in de luchtvaart en de recreatievaart is in PIE-VeV niet uiteengegafeld naar 'dematerialiatie', 'besparing' en 'aanbod' (zie voor de reden hoofdstuk 3). In PIE-VeV wordt de ontwikkeling van het finaal energiegebruik door deze vervoerwijzen daarom exogeen ingevoerd. Wel wordt het energiegebruik door deze modaliteiten afhankelijk verondersteld van de brandstofprijs middels de elasticiteiten uit Tabel 3.

## **5.5.2 Goederenvervoer**

### Bestelauto's en vrachtauto's

Hogere brandstofprijzen hebben een negatief effect op de vraag naar goederenwegvervoer, maar ook de beladingsgraden, modal-split en het brandstofverbruik. Brandstofkosten zijn namelijk een onderdeel van de totale transportkosten, die mede de vraag naar goederenwegvervoer bepalen. Voor het bepalen van de brandstofprijselasticiteit is gebruik gemaakt van een tweetal studie, namelijk Geurs en Van Wee (1997; een literatuur studie) en NEI/CE (1999; literatuurstudie, enquête en modelruns met SMILE). Geurs en van Wee komen tot een brandstofprijselasticiteit van de vraag naar tonkilometers van -0,1 tot -0,2 op de lange termijn. Het NEI/CE komt op een brandstofprijselasticiteit op tonkilometers van

minder dan  $-0,1$  op de lange termijn. In PIE is een brandstofprijselasticiteit op tonkilometers van  $-0,1$  aangehouden.

### Binnenvaart

Dings et al. (1999) geven een prijselasticiteit van de vraag naar binnenvaart (in tonkilometers) van  $-0,3$  tot  $-1,2$ . Bückman et al. (1999) geven op basis van tijdreeksanalyses een prijselasticiteit van de vraag naar tonkilometers van  $-0,74$ , dat vrijwel in het midden ligt van de range van Dings et al. Deze waarde is aangehouden voor PIE.

Het aandeel van de brandstofkosten in de totale kosten van de binnenvaart varieert, afhankelijk van de scheepsgrootte. Bovendien is het aandeel van schepen in diverse laadvermogensklassen verschillend. Tabel 4 geeft een overzicht van beide variabelen

Tabel 4: Aandeel schepen en aandeel brandstofkosten in totale kosten, per scheepsklasse

gewichtsklasse (ton death weight)	aandeel in schepen	aandeel brandstofkosten in totale kosten
< 650	1404	18,9
650 – 1000	1027	23,4
1000 – 1500	1039	19,3
1500 – 3000	965	17,0
> 3000	136	13,1

De verkeers- en zeker de vervoersprestatie is vermoedelijk niet voor alle gewichtsklassen gelijk. Met name de vervoersprestatie zal voor grotere schepen groter zijn dan voor kleinere schepen. Verondersteld is een gewogen gemiddelde van de brandstofkosten in de totale vervoerskosten van 18%.

De tarieven zullen hoger zijn dan de kosten; het verschil is de winst voor de ondernemer. Verondersteld is een gemiddeld winstpercentage van 5%. In dat geval ligt de brandstofkosten elasticiteit van het aantal tonkilometers in de binnenvaart op circa 17%. De brandstofkosten-elasticiteit is dan  $0,17\% * -0,74 = -0,13$ .

Brandstofprijzen werken minder dan evenredig door in de brandstofkosten; het verschil is een efficiencyverbetering. Deze kan het gevolg zijn van aangepast vaargedrag, gebruik van zuiniger motoren en schiepprompen, en van logistieke verbeteringen (hogere beladingsgraden). Er zijn diverse technische mogelijkheden om brandstof te besparen in de binnenvaart (Kasifa, 2002). Vanwege de lange levensduur van binnenschepen en hun motoren zal in 2020 nog niet het volledige effect van een brandstofprijsverhoging in bijvoorbeeld 2005 of 2001 zijn bereikt. Voor de termijn van 10 tot 15 jaar is verondersteld dat een verhoging van de brandstofprijs voor 20 tot 25% ‘weglekt’ door verbetering van de brandstofefficiency. In verband hiermee is de brandstofprijselasticiteit van de vraag naar tonkilometers in PIE-VeV van  $-0,1$  gehanteerd.

Als brandstofprijselasticiteit van de vraag naar brandstof door de binnenvaart is voor een termijn van 10 tot 15 jaar geschat op  $-0,13$ . PIE-VeV houdt niet automatisch rekening met deze besparingseffecten. De besparingseffecten kunnen wel handmatig worden ingevoerd.

### Goederentreinen

Over de brandstofprijselasticiteit van het goederenvervoer per spoor is geen literatuur bekend. Verondersteld is dat de brandstofprijselasticiteit gelijk is aan die van de binnenvaart.

### Zeevaart

Over de brandstofprijselasticiteit van de zeevaart is nauwelijks literatuur bekend. Hoff et al. (2001) geven twee onderzoeken waarin de invloed van verhogingen van de tonkilometerprijs op het aantal vervoerde tonnen is weergegeven. Deze prijselasticiteit varieert – afhankelijk van de bron en het type product – van 0 tot  $-3,0$ . Door Hoff et al. is met een grote onzekerheidsmarge een middenwaarde van  $-0,3$  verondersteld. De brandstofkosten hebben een aandeel van circa 35% in de totale kosten (Hoff et al., 2001), waardoor de brandstofprijselasticiteit van de vraag naar vervoerde tonnen circa  $-0,1$  zou bedragen. Deze waarde is in PIE-VeV verondersteld. Daarbij moet de kanttekening worden geplaatst, dat de waarde een relatief grote onzekerheid kent.

Naast een invloed op de vraag (het vervoersvolume) gaat van hogere brandstofprijzen een stimulans uit om de vaarsnelheid te verlagen en om zuiniger schepen te ontwikkelen. Verondersteld is een brandstofprijselasticiteit voor de vraag naar brandstof van  $-0,2$ .

### Mobiele werktuigen en speciale voertuigen

Hierover is geen literatuur aangetroffen. Aangenomen is dat de elasticiteit  $-0,1$  bedraagt.

*Tabel 5: Brandstofprijselasticiteiten voor de vraag naar goederenvervoer*

modaliteit	brandstofprijselasticiteit	voor de vraag naar:
vrachtwagens	$-0,1$	tonkilometers
bestelauto's	$-0,1$	tonkilometers
binnenvaart	$-0,1$	tonkilometers
goederentreinen	$-0,1$	tonkilometers
zeescheepvaart	$-0,2$	finaal energiegebruik
mobiele werktuigen <sup>a)</sup>	$-0,1$	finaal energiegebruik
speciale voertuigen <sup>a)</sup>	$-0,1$	finaal energiegebruik

a) deze modaliteiten zijn in PIE-VeV onderbracht bij de subsector goederenvervoer alhoewel deze modaliteiten niet betrokken zijn in het goederenvervoer.

De ontwikkeling van het energiegebruik door de zeescheepvaart, mobiele werktuigen en speciale voertuigen is in PIE-VeV niet uiteengerafeld naar 'dematerialiatie', 'besparing' en 'aanbod' (zie voor de reden hoofdstuk 3). In PIE-VeV is de ontwikkeling van het finaal energiegebruik door deze vervoerwijzen in het referentiescenario daarom exogeen ingevoerd. Wel wordt het energiegebruik door deze modaliteiten afhankelijk verondersteld van de brandstofprijz middels de elasticiteiten uit Tabel 5.



## 6 Vervoerwijzekeuze en benutting ('Dematerialisatie')

Het effect van een toenemende vervoersomvang op het energiegebruik in het personen- en goederenvervoer is onder meer afhankelijk van de verdeling van het aantal reizigers- of tonkilometers over de verschillende vervoerswijzen (modal split) en de benutting (bezetting of belading) van deze vervoerswijzen. In het geval van bijvoorbeeld een toenemende benuttinggraad neemt het energiegebruik minder toe dan de vervoersomvang. Veranderingen in de modal split en veranderingen in de benutting van vervoerswijzen worden in PIE-VeV geschaard onder 'dematerialisatie'.

In PIE-VeV wordt in de rekenstap 'volume' de vraag naar nuttige warmte berekend waarbij alleen rekening wordt gehouden met de toename van de totale vervoersomvang. In de rekenstap 'dematerialisatie' wordt de vraag naar nuttige warmte berekend waarbij bovendien rekening wordt gehouden met de gewijzigde modal split en benutting van vervoerswijzen. De effecten van veranderingen in 'besparing' en 'aanbod' worden in deze rekenstap nog buiten beschouwing gelaten.

### 6.1 Vervoerwijzekeuze

In PIE is standaard de vervoerwijzekeuze uit het EC-scenario van de MV5 opgenomen. Deze kan naar eigen inzicht worden gewijzigd bijvoorbeeld wanneer het beleid hier aanleiding toe geeft.

Tabel 6: Modal split in het personen- en goederenvervoer over Nederlands grondgebied

	EC-scenario				
	1995	2000	2010	2020	2030
<b>personenvervoer (rkm)</b>					
personenauto	85%	85%	86%	87%	88%
motor- + bromfiets	2%	2%	1%	1%	1%
autobus	5%	5%	4%	4%	3%
railvervoer	8%	9%	8%	8%	7%
totaal	100%	100%	100%	100%	100%
<b>goederenvervoer (tonkm)</b>					
bestelauto	4%	4%	5%	5%	4%
vrachtauto + trekker	60%	62%	65%	70%	74%
binnenvaart	33%	31%	26%	21%	17%
railvervoer	3%	3%	5%	5%	5%
totaal	100%	100%	100%	100%	100%

bron: MV5 (Feimann et al., 2000)

## 6.2 Benutting

In PIE is standaard de benutting uit het EC-scenario van de MV5 opgenomen (zie Tabel 7). Het betreft de gemiddelde bezetting en belading van vervoermiddelen inclusief leegrijden. De bezetting en belading kunnen naar eigen inzicht worden gewijzigd wanneer hiervoor een aanleiding is.

Tabel 7: Bezetting (aantal passagiers) en belading (aantal tonnen)

	EC-scenario				
	1995	2000	2010	2020	2030
<b>personenvervoer</b> (aantal)					
personenauto	1,7	1,6	1,5	1,5	1,5
motor- + bromfiets	1,1	1,1	1,1	1,1	1,1
autobus	13,5	13,5	13,5	13,5	13,5
railvervoer	132	132	132	132	132
<b>goederenvervoer</b> (tonnen)					
bestelauto	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
vrachtauto + trekker	9,3	9,1	9,3	9,4	9,5
binnenvaart	649	645	633	619	619
railvervoer	367	367	367	367	367

bron: MV5 (Feimann et al., 2000)



## 7 Energiegebruik per voer- of vaartuigkilometer ('Besparing')

In PIE-VeV wordt in de rekenstap 'besparing' de vraag naar nuttige warmte berekend waarbij alleen rekening wordt gehouden met de toename van de totale vervoersomvang ('volume'), de veranderingen in modal split en benutting ('dematerialisatie') en de effecten van 'besparing'. Het effect van veranderingen in het 'aanbod' worden in deze rekenstap nog buiten beschouwing gelaten.

Onder besparingsopties worden alle maatregelen verstaan die het energiegebruik per voer- en vaartuigkilometer verminderen. Het energiegebruik per voer- of vaartuigkilometer wordt ook wel specifiek energiegebruik genoemd. Het specifiek energiegebruik kan in principe op twee manieren worden verminderd: 1) of de benodigde aandrijfenergie aan de wielen (of scheepsschroef) wordt verminderd of 2) het rendement van motor wordt vergroot. Voorbeelden van maatregelen van de eerste categorie zijn het verbeteren van de stroomlijn van voertuigen maar ook het verminderen van de snelheid of het gelijkmatiger rijden. Het toepassen van directe insputing bij dieselmotoren in personenauto's of het gebruik van brandstofcellen met elektromotoren zijn voorbeelden van de tweede categorie.

Aangezien maatregelen van de eerste categorie ook invloed (kunnen) hebben op het motorrendement is het onmogelijk de in de MV5 geprognosticeerde verandering in het energiegebruik op te splitsen naar een 'vermindering van benodigde aandrijfenergie' en een 'verhoging van het motorrendement'. Daarom wordt in PIE het motorrendement geschat voor 1995 en wordt voor alle zichtjaren constant verondersteld (zie Tabel 1 in hoofdstuk 4). De vermindering van het energiegebruik zoals in het EC-scenario van de MV5 is ingeschat wordt dus volledig toegeschreven aan een vermindering van de benodigde aandrijfenergie, ofwel aan de factor 'besparing'. Tabel 8 geeft de veranderingen in het energiegebruik per voer- of vaartuigkilometer voor het EC-scenario van de MV5.

Tabel 8: Energiegebruik per voer- en vaartuigkilometer (index: 1995 = 100)

		EC-scenario			
		2000	2010	2020	2030
<b>personenvervoer</b>					
personenauto	benzine	99	82	73	74
	diesel	95	76	72	73
	LPG	97	76	66	67
motor- + bromfiets		100	100	100	100
autobus		101	99	100	100
railvervoer	elektrisch	101	101	97	89
	diesel	101	100	96	92
<b>goederenvervoer</b>					
bestelauto	benzine	99	82	73	73
	diesel	99	80	77	77
	LPG	97	76	66	66
vrachtauto + trekker		101	99	98	98
binnenvaart		99	94	89	86
railvervoer	elektrisch	101	101	97	89
	diesel	101	100	96	92

bron: MV5 (Feimann et al., 2000)

Wat wel een verandering van het motorrendement (ofwel de factor 'aanbod') in PIE-VeV tot gevolg heeft is de penetratie van hybride voertuigen. Zie hiervoor het volgende hoofdstuk.



## 8 Samenstelling en rendement motortype-brandstof-combinaties ('Aanbod')

In de rekenstap 'aanbod' wordt het effect op het finale energiegebruik berekend van de verandering in de samenstelling van het voertuigenpark naar motortype-brandstofcombinaties en het rendement daarvan. De conventionele manier is het gebruik van diesel, benzine of LPG in een verbrandingsmotor. De verbrandingsmotor kan ook een groot aantal alternatieve brandstoffen zoals aardgas, alcoholen, waterstof en biodiesel omzetten in mechanische aandrijfenergie. Een andere manier is het gebruik van waterstof, methanol of benzine in een brandstofcel gecombineerd met een elektromotor. Daarnaast kan rechtstreeks gebruik gemaakt worden van elektriciteit dat aan boord wordt opgeslagen in batterijen en in het voertuig wordt omgezet in aandrijfkracht middels een elektromotor.

PIE-VeV onderscheidt twee energie-omzetters te weten: interne verbrandingsmotoren (Internal Combustion Engines; ICE) en brandstofcellen met elektromotoren (Fuel Cells; FC). Binnen ICE's maakt PIE-VeV onderscheid naar meerdere typen brandstof, te weten benzine, diesel, LPG, aardgas (CNG), alcohol (methanol/ethanol), biodiesel en DME (dimethylether). FC's worden verondersteld in de toekomst of waterstof te gebruiken of benzine. De methanoptie is buiten beschouwing gelaten omdat voor deze optie een relatief dure reformer nodig is én de brandstofinfrastructuur moet worden aangepast. In het geval van benzine moet weliswaar ook een reformer aan boord van het voertuig worden geïnstalleerd maar kunnen voertuigen gebruik maken van de bestaande brandstofinfrastructuur. De methanoptie zal het daarom waarschijnlijk zeker afleggen tegen de benzine-optie. Bij treinen kan de gebruiker kiezen voor een willekeurige mix van elektrisch, ICE-diesel en ICE-CNG.

In de MV5 is verondersteld dat in de periode 1995-2030 het aandeel van motortypen anders dan verbrandingsmotoren (ICE's) verwaarloosbaar is. Hetzelfde geldt voor het aandeel van alternatieve brandstoffen (anders dan benzine, diesel en LPG). De gebruiker van PIE-VeV kan van deze veronderstelling afwijken. In Tabel 9 en 10 zijn de aandelen van de verschillende motortype-brandstofcombinaties weergegeven voor de MV5-scenario's.

Tabel 9: Samenstelling van voer- en vaartuigkilometers naar motortype-brandstofcombinaties (personenvervoer)

		EC-scenario				
		1995	2000	2010	2020	2030
<b>personenvervoer</b>						
personenauto	ICE-benzine	68%	67%	64%	64%	60%
	ICE-diesel	19%	22%	26%	23%	20%
	ICE-LPG	13%	11%	10%	13%	20%
	overig	0%	0%	0%	0%	0%
autobus	ICE-diesel	100%	100%	100%	100%	100%
	overig	0%	0%	0%	0%	0%
railvervoer	elektrisch	93%	93%	93%	93%	93%
	ICE-diesel	7%	7%	7%	7%	7%
	overig	0%	0%	0%	0%	0%

bron: MV5 (Feimann et al., 2000)

Tabel 10: Samenstelling van voer- en vaartuigkilometers naar motortype-brandstofcombinaties (goederenvervoer)

		1995	EC-scenario			
			2000	2010	2020	2030
<b>goederenvervoer</b>						
bestelauto	ICE-benzine	14%	14%	14%	14%	14%
	ICE-diesel	83%	83%	83%	83%	83%
	ICE-LPG	4%	4%	4%	4%	4%
	overig	0%	0%	0%	0%	0%
vrachtauto	ICE-diesel	100%	100%	100%	100%	100%
	overig	0%	0%	0%	0%	0%
binnenvaart	ICE-diesel	100%	100%	100%	100%	100%
	overig	0%	0%	0%	0%	0%
railvervoer	elektrisch	70%	70%	86% <sup>a)</sup>	86%	86%
	ICE-diesel	30%	30%	14%	14%	14%
	overig	0%	0%	0%	0%	0%

a) verhoging van het rendement is het gevolg van de toepassing van 25 kV-wisselspanning bij de Betuweroute, 25 kV-wisselspanning geeft minder energieverliezen dan de huidige toegepaste 1500 V-gelijkspanning

bron: MV5 (Feimann et al., 2000)

Tabel 11 geeft voor de verschillende combinaties van motortype en brandstof het motorrendement ten opzichte van IC-benzine. In PIE-VeV is ervoor gekozen het motorrendement in de tijd constant te veronderstellen en veranderingen in het energiegebruik van vervoermiddelen per kilometer onder de factor 'besparing' te scharen.

Tabel 11: Motorrendement voor verschillende motortype-brandstofcombinaties

motortype	brandstof	rendement [index: IC-benzine = 100]
interne verbrandingsmotor (IC)	benzine	100
interne verbrandingsmotor (IC)	diesel	130
interne verbrandingsmotor (IC)	LPG	100
interne verbrandingsmotor (IC)	CNG	85
interne verbrandingsmotor (IC)	ethanol/methanol	85
interne verbrandingsmotor (IC)	biodiesel	100
interne verbrandingsmotor (IC)	DME	104
brandstofcel (FC) + elektromotor	waterstof	46
brandstofcel (FC) + elektromotor	benzine	102
elektromotor	elektriciteit	29

Wat wel een verandering van het motorrendement in PIE-VeV tot gevolg kan hebben is de toekomstige penetratie van hybride voertuigen in het voertuigenpark. Hybride voertuigen bezitten in essentie twee aandrijvingen, in veel gevallen is dit een verbrandingsmotor en een elektromotor. Bij de meest gangbare hybride aandrijving draait de motor op een dusdanig constant toerental en belasting dat het motorrendement optimaal is. De motor laadt accu's op die op hun beurt de elektromotor van energie voorzien. Het energetische voordeel van hybride aandrijving zit niet alleen in het feit dat de verbrandingsmotor een veel hoger rendement heeft dan wanneer deze bij wisselende belastingen en toerentallen wordt gebruikt, maar ook dat remenergie kan worden teruggewonnen. De elektromotor werkt tijdens het remmen namelijk als dynamo. Op basis van literatuur is verondersteld dat hybride voertuigen circa 40% minder energie gebruiken in vergelijking tot conventionele voertuigen (Weiss et al., 2000). Dit betekent in termen van motorrendement dat het motorrendement (in procenten)

van een hybride voertuig een factor  $1/0,6 = 1,6$  hoger is dan dat van een conventioneel voertuig.

Hybride aandrijvingen worden in de toekomst naar verwachting alleen toegepast in personenauto's en lichte bedrijfsvoertuigen en niet in zware bedrijfsvoertuigen. Dit omdat hybride aandrijvingen relatief veel ruimte innemen en dit in het geval van bijvoorbeeld vrachtauto's strijdig is met het streven naar een zo hoog mogelijke beladingsgraad.



## 9 Energiegerelateerde emissiefactoren

### 9.1 Inleiding

Dit hoofdstuk gaat in op de energiegerelateerde emissiefactoren (g/GJ) bij het gebruik van alternatieve aandrijfconcepten (combinatie van aandrijftechnologie en de daarbij toegepaste brandstof) in vergelijking tot het gebruik van fossiele brandstoffen in interne verbrandingsmotoren. Het gaat bij alternatieven zowel om alternatieven voor brandstoffen voor conventionele verbrandingsmotoren als om alternatieven voor de verbrandingsmotor zoals de elektromotor gecombineerd met een accu of brandstofcel. De brandstofcel kan worden gevoed met verschillende soorten brandstoffen zoals methanol, aardgas en waterstof. Ook is het mogelijk dat benzine aan boord van het voertuig wordt omgezet in waterstof.

In dit hoofdstuk wordt de CO<sub>2</sub>-emissie per eenheid van finaal energiegebruik gegeven van alle in PIE-VeV vertegenwoordigde aandrijfconcepten. Het betreft de emissies ter plaatse van het voer- of vaartuig en dus niet de well-to-wheel CO<sub>2</sub>-emissies. Daarnaast wordt in dit hoofdstuk per aandrijfconcept ingegaan op de voertuigemissies in vergelijking tot die van conventionele verbrandingsmotoren bij gebruik van fossiele brandstoffen. De absolute in PIE-VeV gebruikte emissiefactoren zijn weergegeven in Bijlage 2 van dit rapport. Allereerst wordt een korte beschrijving gegeven van het in PIE-VeV gehanteerde referentiescenario.

### 9.2 Referentiescenario (EC-scenario MV5)

In het EC-scenario van de MV5, dat in PIE-VeV als referentiescenario wordt gehanteerd, wordt uitgegaan van het beleid zoals dat op 1 januari 2000 was geaccordeerd, of zeer waarschijnlijk zou worden geaccordeerd. Dat betekent voor personen- en bestelauto's dat emissienormstelling tot en met Euro4 (ingaaand op 1-1-2005) in het scenario is meegenomen en voor zware vrachtvoertuigen (vrachtauto's, trekkers autobussen) dat emissienormstelling tot en met Euro5 (ingaaand op 1-10-2008) is meegenomen. Verder is bij de binnenvaart de invoering van fase 1-normstelling (omstreeks 2002/2003) meegenomen.

In het referentiescenario is geen rekening gehouden met vrachtvoertuigen op andere brandstoffen dan diesel. Wel behoort het natuurlijk tot de mogelijkheden van het model om een bepaalde penetratie van alternatieve brandstoffen te veronderstellen.

In het referentiescenario is verder uitgegaan van aanscherpingen van de EU-eisen voor de brandstofkwaliteit in 2000 en in 2005. Vanaf 1-1-2005 mogen zowel benzine als diesel in het wegverkeer niet meer dan 50 ppm zwavel bevatten. Vanaf 2003 wordt het maximum zwavelgehalte van zware stookolie dat wordt ingezet op de Noordzee verlaagd tot 1,5 gewichtsprocent en vanaf 2008 wordt dat van dieselolie voor het niet-wegverkeer verlaagd tot 1000 ppm (= 0,1 gewichtsprocent).

### 9.3 CO<sub>2</sub>-emissies

Voor voertuigen/vaartuigen met een brandstofcel gebruikmakend van aan boord opgeslagen waterstof en voor voertuigen/vaartuigen met een elektromotor geldt dat ter plaatse van het voertuig/vaartuig geen CO<sub>2</sub>-emissies optreden. Afhankelijk van de wijze van productie van waterstof of elektriciteit kunnen bij de productie van waterstof of elektriciteit natuurlijk wel CO<sub>2</sub>-emissies optreden. Deze CO<sub>2</sub>-emissies worden in PIE aan andere sectoren toegedeeld.

Tabel 10: CO<sub>2</sub>-emissie per eenheid van finaal energiegebruik ter plaatse van het voertuig/vaartuig bij verschillende aandrijfconcepten

technologie	brandstof	CO <sub>2</sub> -emissie voertuig/vaartuig [kg/GJ brandstof]
interne verbrandingsmotor (IC)	benzine	72
interne verbrandingsmotor (IC)	diesel	73
interne verbrandingsmotor (IC)	LPG	66
interne verbrandingsmotor (IC)	CNG	56
interne verbrandingsmotor (IC)	ethanol/methanol	65
interne verbrandingsmotor (IC)	biodiesel	73
interne verbrandingsmotor (IC)	DME	68
brandstofcel (FC) + elektromotor	waterstof	0
brandstofcel (FC) + elektromotor	benzine	72
elektromotor	elektriciteit	0

## 9.4 Overige emissies (NO<sub>x</sub>, CO, NMVOS, PM<sub>10</sub>)

Deze paragraaf gaat in op de emissiefactoren van het gebruik van alternatieve brandstoffen in conventionele verbrandingsmotoren. Aan de hand van de bij het RIVM beschikbare literatuur is voor alle alternatieve brandstoffen vastgesteld hoe hoog de voertuigemissies zijn in vergelijking tot benzine, in het geval lichte wegvoertuigen en diesel in het geval van zware wegvoertuigen en niet-wegverkeer. De gegevens uit de literatuur lopen vaak nogal uiteen. Voor PIE is desalniettemin de ongewogen gemiddelde waarde van alle in de literatuur gevonden waarden genomen. De gemiddelde waarden zijn op tientallen afgerond, ofwel: 10% toename/afname, 20% toename/afname, etc. Bijlage 2 geeft de absolute emissiefactoren zoals gebruikt in PIE-VeV. Bijlage 2 geeft ook emissiefactoren voor SO<sub>2</sub> en voor door slijtage veroorzaakte PM<sub>10</sub>. De SO<sub>2</sub>-emissies bij gebruik van brandstoffen anders dan benzine, diesel en LPG worden geacht gelijk te zijn aan nul. De door slijtage veroorzaakte PM<sub>10</sub>-emissies worden niet beïnvloed door het gebruik van alternatieve brandstoffen noch door het gebruik van alternatieve voertuigtechnologie.

De emissies uit brandstofcellen en elektromotoren worden verwaarsloosbaar verondersteld in vergelijking tot die uit verbrandingsmotoren. Wanneer brandstofcellen worden gecombineerd met een reformer die methanol of benzine omzet in waterstof, emitteren deze krachtbronnen kleine hoeveelheden CO, VOS en NO<sub>x</sub>, echter nog steeds aanzienlijk minder dan de huidige moderne verbrandingsmotoren.

### 9.4.1 Personenauto's en bestelauto's (light duty vehicles)

#### IC-CNG

De effecten op emissies van het gebruik van aardgas in een verbrandingsmotor zijn ontleend aan Van Walwijk et al. (1996) en aan Johansson (1999). Tabel 11 geeft de schattingen uit beide bronnen. Zoals te zien zijn de bandbreedtes zeer groot hetgeen vermoedelijk te wijten is aan verschillen in voertuigtechnologie (bijvoorbeeld wel of geen gebruik katalysator). Het effect op de NO<sub>x</sub>-emissie van omschakeling naar aardgas is volgens beide bronnen circa 40 tot 50% emissiereductie. In PIE wordt desalniettemin verondersteld dat de NO<sub>x</sub>-emissie van personenauto's met aardgasmotor in de toekomst gelijk is aan die van LPG-persenauto's. Om benzine-persenauto's op aardgas te laten rijden moet de motor worden omgebouwd waarna voor dat type personenauto een typegoedkeuring moet worden verkregen. Onderdeel van een dergelijke typegoedkeuring is een emissietest. Personenauto's met een aardgasmotor moeten aan dezelfde emissienormstelling voldoen als benzine-persenauto's. De NMVOS-emissie door aardgasvoertuigen is vermoedelijk wel lager doordat de totale VOS-emissie (incl. CH<sub>4</sub>) gereguleerd wordt en de VOS-emissie van aardgasvoertuigen voor het grootste gedeelte bestaan uit CH<sub>4</sub>. De deeltjesemissie door aardgasvoertuigen is vermoedelijk iets lager (30%) dan die van benzine-voertuigen.



In PIE is verondersteld dat de relatieve effecten van het gebruik van aardgas ten opzichte van het gebruik van benzine onafhankelijk zijn van het zichtjaar.

Tabel 11: Emissiefactoren van personenauto's op aardgas (relatief t.o.v. gelijkwaardige benzinevoertuigen; index: benzine = 100)

	Van Walwijk et al. (1996)		Johansson (1999)		toegepast in PIE-VeV
	bandbreedte	gemiddeld	in 1996	in 2015	
CO	28 – 83	35	-	-	n.v.t.
VOS	65 – 462	195	-	-	n.v.t.
NMVOS	4 – 26	10	6	13	<b>10</b>
PM <sub>10</sub>	-	-	54	83	<b>70</b>

### IC-alcohol

Aan de fossiele benzine kan zonder aanpassingen een bepaald aandeel (bio-)ethanol of (bio-)methanol worden bijgemengd. Om een Ottomotor (huidige benzinemotor) op pure methanol te laten lopen moet de motor worden aangepast vanwege de lagere energie-inhoud van methanol en vanwege het feit dat minder zuurstof nodig is om één kilogram methanol te verbranden. Wanneer wordt verondersteld dat de motoraanpassing niet gepaard gaat met een hernieuwde typegoedkeuring dan geeft Tabel 12 de effecten van het gebruik van methanol in een Ottomotor ten opzichte van het gebruik van benzine. Voor NO<sub>x</sub> blijken de schattingen uiteen te lopen van 10% reductie tot 75% reductie. Er wordt in PIE uitgegaan van het rekenkundig gemiddelde van de vier bronnen.

Twee bronnen (Johansson, 1999 en Michaelis, 1995) suggeren een volledige eliminatie van PM<sub>10</sub>-emissie bij het gebruik van methanol in een Ottomotor. Gezien het feit dat methanol zuurstof aan zich heeft gebonden, lijkt het aannemelijk dat de deeltjesemissie lager is. Bovendien bevat methanol geen zwavel zodat zich ook geen sulfaatdeeltjes kunnen vormen. Een afname met 100% is echter niet aannemelijk omdat het nog steeds een verbrandingsproces betreft. Er wordt in PIE daarom uitgegaan van 50% reductie van de PM<sub>10</sub>-emissie.

Wanneer motoren in plaats van pure methanol/ethanol alcoholen worden bijgemengd aan benzine, wordt verondersteld dat de effecten in Tabel 12 naar rato van het aandeel bijmenging zullen gelden. Ofwel 10% bijmenging van alcoholen geeft een 5% verlaging van de PM<sub>10</sub>-emissie en een 4% lagere NMVOS-emissie.

Tabel 12: Emissiefactoren van personenauto's op methanol (relatief t.o.v. gelijkwaardige benzinevoertuigen; index: benzine = 100)

	Van Walwijk et al. (1996)		Johansson (1999)		Muhl en Petra (1992)	Michaelis (1995)	toegepast in PIE-VeV
	bandbreedte	gemiddeld	in 1996	in 2015			
CO	30 – 129	80	-	-	95	100	n.v.t.
(NM)VOS	45 – 147	96	92	38	60	50	<b>60</b>
PM <sub>10</sub>	-	-	0	0	-	0	<b>50</b>

### IC-biodiesel

Informatie over het effect van het gebruik van biodiesel (zoals raapzaad en koozaadmethylesters) op de emissies van personenauto's met een dieselmotor, is ontleend

aan Van Walwijk et al. (1996) en aan May et al. (1997). Beide bronnen geven vergelijkbare effecten. Alleen de VOS-emissie wordt significant gereduceerd.

Tabel 13: Emissiefactoren van personenauto's op biodiesel (relatief t.o.v. emissiefactoren van gelijkwaardige dieselveertuigen; index: diesel = 100)

	Van Walwijk et al. (1996)		May et al. (1997)		Sams en Schindlbauer (1992)	toegepast in PIE-VeV
	bandbreedte	gemiddeld	bandbreedte	gemiddeld		
NO <sub>x</sub>	95 – 120	110	85 – 105	95	110	<b>105</b>
CO	70 – 95	80	75 – 100	95	90	n.v.t.
(NM)VOS	50 – 85	70	75 – 90	80	80	<b>80</b>
PM <sub>10</sub>	65 – 105	85	40 – 155	90	120	<b>100</b>

### IC-DME

Effecten van het gebruik van DME (DiMethylEther) op de emissies van personenauto's met dieselmotor zijn ontleend aan Van Walwijk et al. (1996), Verbeek en Van Doorn (1996) en OECD/IEA (1999).

Tabel 14: Emissiefactoren van personenauto's op DME (relatief t.o.v. emissiefactoren van gelijkwaardige dieselveertuigen; index: diesel = 100)

	Van Walwijk et al. (1996)	Verbeek en Van Doorn (1996)	OECD/IEA (1999)	toegepast in PIE-VeV
NO <sub>x</sub>	30	17 – 22	15	<b>20</b>
CO	270	25 – 560	60	n.v.t.
(NM)VOS	60	25 – 182	5	<b>50</b>
PM <sub>10</sub>	0	-	0	<b>0</b>

## 9.4.2 Vrachtauto's, trekkers en bussen (heavy duty vehicles)

### IC-LPG en IC-CNG

Gegevens over het effect van het ombouwen van heavy duty-dieselmotoren naar LPG zijn zeer talrijk en uiteenlopend. De oorzaak hiervoor is dat een dieselmotor moet worden omgebouwd tot of een stoichiometrische of een arm-mengsel (lean-burn) ottomotor om op LPG te kunnen lopen. In geval van een stoichiometrische ottomotor kan eenvoudig een driewegkatalysator worden toegepast die grote emissiereducties kan bewerkstelligen. Wordt de dieselmotor daarentegen omgebouwd tot lean-burn ottomotor, dan kan weliswaar een reductie van het brandstofverbruik worden bereikt maar kan geen driewegkatalysator worden toegepast. De verschillen tussen de emissies van een stoichiometrische ottomotor met driewegkatalysator en een lean-burn ottomotor zijn voor met name NO<sub>x</sub> groot. De emissieverandering ten opzichte van een dieselmotor zijn mede afhankelijk van de technische uitvoering van de Ottomotor.

Volgens Kampman (2001) zijn de VOS-, NO<sub>x</sub>- en PM<sub>10</sub>-emissies van de huidige schoonste LPG-vrachtauto met driewegkatalysator respectievelijk 60, 60 en 95% lager dan van een Euro3-dieselvrachtauto's. Deze LPG-vrachtauto voldoet daarmee reeds aan de zogenaamde Environmentally Enhanced Vehicle (EEV)-emissionormen die gelijk aan aan de Euro5-normen. De Euro5-normen worden vanaf oktober 2009 van kracht voor alle nieuw-verkochte vrachtauto's. Voor NO<sub>x</sub> komt dit overeen met circa 2 g/kWh, voor VOS met 0,15 g/kWh en voor PM<sub>10</sub> met 0,01 g/kWh. Verondersteld is dat alle LPG-vrachtauto's die vanaf 2002 op de markt komen voldoen aan de EEV-emissionormen. Vanaf 2009, wanneer de Euro5-normstelling voor dieselvrachtauto's van kracht wordt, is er geen verschil meer tussen diesel en LPG voor wat betreft de NO<sub>x</sub>-emissie. De PM<sub>10</sub>-emissie door LPG-vrachtauto's is dan nog steeds ca. 75% lager, de VOS-emissie is 60% lager.

Voor CNG worden dezelfde effecten op emissies verondersteld als voor LPG, met uitzondering van NMVOS. Aangezien aardgas uit methaan (CH<sub>4</sub>) bestaat is de niet-methaan emissie aanzienlijk lager dan voor LPG-motoren. Op basis van Blinge et al. (1997) wordt verondersteld dat de NMVOS-emissie van aardgasmotoren ten opzichte van LPG-motoren 90% lager is (zie Tabel 15).

Tabel 15: Emissiefactoren heavy-duty LPG- en CNG-motoren in het wegverkeer

	LPG	CNG
NO <sub>x</sub>	0,22 (g/MJ)	0,22 (g/MJ)
NMVOS	60% lager dan diesel	96% lager dan diesel
PM <sub>10</sub>	75% lager dan diesel	75% lager dan diesel
SO <sub>2</sub>	0 (g/MJ)	0 (g/MJ)

### IC-alcohol

Het meeste onderzoek naar toepassing van alcoholen in dieselmotoren richt zich op methanol (Van Walwijk et al., 1996). Daarom wordt in deze paragraaf geen aandacht besteed aan de effecten bij de toepassing van ethanol.

Meerdere bronnen geven meetgegevens over de effecten van het gebruik van methanol in dieselmotoren. Met name de effecten op CO en VOS zijn sterk afhankelijk van de vraag of het methanolvoertuig is uitgerust met een oxidatiekatalysator. Dit verklaart de grote bandbreedtes in Tabel 16. In PIE wordt er vanuit gegaan dat toekomstige methanolvoertuigen worden uitgerust met een oxidatiekatalysator. Verondersteld wordt dat er bij gebruik van een oxidatiekatalysator geen verandering in de VOS- en CO-emissie optreedt als gevolg van de overschakeling van diesel naar methanol.

Tabel 16: Emissiefactoren van vrachtauto's op methanol ((relatief t.o.v. emissiefactoren van gelijkwaardige dieselveertuigen; index: diesel = 100)

	Van Walwijk et al. (1996)		OECD/IEA (1999)	Blinge et al. (1997)	Black (1991)	Rideout et al. (1994)	toegepast in PIE
	bandbreedte	gemiddeld					
NO <sub>x</sub>	44 – 84	64	43 – 50	50 – 55	85 – 92	60	<b>60</b>
CO	71 – 80	75	81 – 400	-	21 – 450	70	n.v.t
(NM)VOS	600–1830	1215	59 – 614	50 – 90	85 – 1050 <sup>a)</sup>	800	<b>100</b>
PM <sub>10</sub>	14 – 54	34	19	-	5 – 11	20	<b>20</b>

a) lage waarden gelden voor het gebruik van een oxidatiekatalysator

### IC-biodiesel

In Tabel 17 is de informatie in de gevonden literatuur over het effect van het gebruik van biodiesel in heavy-duty dieselmotoren samengevat. Nagenoeg alle bronnen zijn het erover eens dat biodiesel tot een lichte toename van NO<sub>x</sub>-emissies leidt en tot een lichte afname van VOS-emissies. Voor het effect op de deeltjesemissies geeft May et al. (1997) een zeer grote bandbreedte, variërend van een forse reductie (75%) tot een forse toename (167%).

Tabel 17: Emissiefactoren van vrachtauto's op biodiesel (relatief t.o.v. emissiefactoren van gelijkwaardige dieselveertuigen; index: diesel = 100)

	Van Walwijk et al. (1996)		OECD/IEA (1999)	Havenith (1991)	May et al. (1997)		toegepast in PIE
	bandbreedte	gemiddeld			bandbreedte	gemiddeld	
NO <sub>x</sub>	95 – 120	110	106 – 115	103	104 – 119	110	<b>110</b>
CO	70 – 95	80	67 – 100	104	67 – 150	112	n.v.t.
(NM)VOS	50 – 85	70	80 – 96	106	33 – 100	63	<b>80</b>
PM <sub>10</sub>	65 – 105	85	67	62	25 – 267	132	<b>90</b>

### IC-DME

Van Walwijk et al. (1996) geeft resultaten van metingen aan een heavy-duty diesel motor, vermoedelijk een Euro2, op DME (DiMethyl Ether). De emissies gemeten in de ECE R49 test (13-mode test) bedragen: 3,9 g/kWh voor NO<sub>x</sub>, 2,2 g/kWh voor CO, 0,2 g/kWh voor VOS en 0,05 g/kWh voor PM<sub>10</sub>. De emissies van een Euro2-diesel motor bedragen volgens Verbeek en Van Doorn (1996) respectievelijk 6,9, 0,68, 0,23 en 0,11 g/kWh, zodat de emissiereductie door het gebruik van DME –45%, +224%, –13% en –55% bedragen. De PM<sub>10</sub>-emissie wordt niet veroorzaakt door de brandstof maar door lekkage van smeerolie langs de zuigerveren. Blinge et al. (1997) komen voor de effecten op de NO<sub>x</sub>-emissies met ongeveer dezelfde inschatting.

Verondersteld wordt dat de relatieve effecten ten opzichte van dieselmotoren onafhankelijk zijn van het zichtjaar. Verbeteringen aan dieselmotoren komen immers neer op uitlaatgas-nabehandeling en vermindering van olie lekkage, en hebben vermoedelijk hetzelfde relatieve effect bij gebruik van DME en diesel.

Tabel 18: Emissiefactoren van vrachtauto's op DME (relatief t.o.v. emissiefactoren van gelijkwaardige dieselveertuigen; index: diesel = 100)

	Verbeek en Van Doorn (1996) en Van Walwijk et al. (1996)	Blinge et al. (1997)	toegepast in PIE
NO <sub>x</sub>	30 – 55	40 – 45	<b>45</b>
CO	324	-	n.v.t.
(NM)VOS	87	30 – 55	<b>65</b>
PM <sub>10</sub>	20 – 45	-	<b>35</b>

bron: Van Walwijk et al. (1996), Verbeek en Van Doorn (1996), Blinge et al. (1997)

### 9.4.3 Binnenvaart en railvervoer

De effecten op emissies (in gram per GJ brandstof) van alternatieve brandstoffen in de binnenvaart en het railvervoer zijn in PIE-VeV gelijk verondersteld aan die bij vrachtauto's en bussen. Voor LPG en CNG worden de effecten specifiek voor deze categorieën ingeschat. Dit omdat bij vrachtauto's en bussen is verondersteld dat alle LPG- en CNG-voertuigen die vanaf 2003 op de markt verschijnen zullen voldoen aan de EEV-normstelling, die overeenkomt met de Euro5-normstelling voor dieselmotoren in het wegverkeer (vanaf 2008). Aangezien dieselmotoren in de binnenvaart en het railvervoer aan minder strenge emissienormen hoeven te voldoen dan dieselmotoren in het wegvervoer en voor de binnenvaart en het railvervoer bovendien geen EEV-normen (voor gasmotoren) gelden, zullen de LPG- en CNG-motoren die in de toekomst in deze sectoren gaan worden toegepast vermoedelijk minder 'schoon' zijn dan de LPG- en CNG-motoren in het wegvervoer.

Op basis van Van Walwijk et al. (1996) wordt ingeschat dat LPG- en CNG-motoren, bij gebruik van een driewegkatalysator, een NO<sub>x</sub>-emissie van 0,5 tot 2,5 g/kWh zullen kunnen hebben. Dit is vergelijkbaar met het Euro5-niveau voor dieselmotoren in het wegvervoer. In

PIE is daarom verondersteld dat alle LPG- en CNG-motoren in de binnenvaart en het railvervoer dezelfde NO<sub>x</sub>-emissie zullen hebben als Euro5-dieselmotoren in het wegvervoer.

De NMVOS-emissie van LPG-motoren is ongeveer gelijk aan die van vergelijkbare dieselmotoren, namelijk ongeveer 0,1 g/kWh hetgeen overeenkomt met 0,01 g/MJ brandstof. De NMVOS-emissie van CNG-motoren is volgens Van Walwijk et al. (1996) circa 20% lager dan die van een vergelijkbare dieselmotor. Volgens Klimstra (1990) was de NMVOS-emissie van de aardgasbussen die begin jaren 90 in Utrecht dienst deden gelijk aan 0,05 g/kWh hetgeen overeenkomt met 0,005 g/MJ brandstof.

De PM<sub>10</sub>-emissie van aardgasbussen bedroeg volgens Klimstra circa 0,05 g/kWh. Vermoedelijk komt deze waarde overeen met de laagst meetbare waarde van de destijds gebruikte apparatuur. Van de Weide (1990) stelt dat de PM<sub>10</sub>-emissie van LPG-voertuigen gelijk is aan 0,03 g/kWh en van CNG-voertuigen lager dan 0,03 g/kWh. In PIE wordt voor de PM<sub>10</sub>-emissie van LPG-motoren in de binnenvaart en het railvervoer uitgegaan van 0,03 g/kWh, overeenkomende met 0,003 g/MJ. Voor CNG-motoren wordt uitgegaan van 0,01 g/kWh (= 0,001 g/MJ). Tabel 19 geeft een overzicht van de gehanteerde waarden in PIE-VeV.

*Tabel 19: Emissiefactoren LPG- en CNG-motoren zoals toegepast in de binnenvaart en het railvervoer (in g/MJ brandstof)*

	IC-LPG	IC-CNG
NO <sub>x</sub>	0,22	0,22
NMVOS	0,01	0,005
PM <sub>10</sub>	0,003	0,001
SO <sub>2</sub>	0	0



## 10 Bruikbaarheid van PIE-VeV

Het PIE-deelmodel Verkeer en vervoer (PIE-VeV) is een model waarmee prognoses voor het energiegebruik in de sector verkeer en vervoer uit bijvoorbeeld de Milieuverkenningen op kunnen worden geanalyseerd en vergeleken met de ontwikkelingen in andere sectoren. Daarnaast is PIE-VeV goed te gebruiken om de effecten van veranderingen in de brandstofmix ('aanbod') te berekenen. De beoordeling van alternatieve brandstoffen, eventueel in combinatie met alternatieve aandrijftechnologieën, moet namelijk plaatsvinden op basis van well-to-wheel analyses en niet op basis van alleen de effecten in de sector waar de alternatieve brandstoffen hun toepassing vinden. PIE leent zich uitstekend voor dergelijke beoordelingen omdat zowel de energiegebruikende als de energieproducerende sectoren vertegenwoordigd zijn.

PIE-VeV is minder geschikt voor het beantwoorden van beleidsvragen met betrekking tot de hoeveelheid verkeer en vervoer (volume), zoals: wat zijn de effecten van brandstofprijnsbeleid of van een verandering van de economische groei. Dit wordt met name veroorzaakt door de in PIE gekozen structuur waarbij veranderingen in het vervoersvolume onafhankelijk worden verondersteld van factoren als modal split en bezetting/benutting van vervoerwijzen. Zo zal een toename van het BBP ten opzichte van de waarde in het referentiescenario vermoedelijk leiden tot relatief grotere toename van het vervoer over de weg dan van het vervoer over spoor of door de binnenvaart. Dit betekent impliciet dat een toename van het BBP niet alleen gepaard zal gaan met een toename van het totale vervoersvolume in het goederenvervoer maar ook met een verschuiving in de modal split. De gebruiker dient deze verschuiving handmatig in te voeren wanneer de gebruiker de BBP-ontwikkeling varieert. Wanneer de gebruiker dit nalaat leidt dit tot een inconsistentie in het model. Hetzelfde geldt wanneer de gebruiker de af-raf prijs van motorbrandstoffen bijvoorbeeld verlaagt of het accijns- of BTW-niveau verlaagt. Afhankelijk van de brandstofprijselasticiteiten neemt het vervoersvolume van bepaalde vervoerwijzen door deze brandstofprijsverlaging relatief meer toe dan dat van andere vervoerwijzen. Hierdoor leidt de verlaging van de brandstofprijs niet alleen tot een stijging van de totale vervoersvraag maar ook tot een modal shift in het personen- en goederenvervoer. Omdat de modal split ook door de gebruiker gevarieerd moet kunnen worden, is het niet mogelijk de modal split automatisch te corrigeren bij een verandering van de BBP-ontwikkeling of de de brandstofprijsonwikkeling.





## Referenties

- Blinge M; Arnäs PO; Bäckström S; Furnander A; Hovelius K; (1997) Life-cycle assessment of motor fuels- present best available technology and a future scenario for Sweden, The Swedish Transport and Communications Research Board, KFB, Stockholm
- Bovy PHL, Baanders A; Waard J van der (1990) Hoe kan dat nou? Substitutiemogelijkheden tussen auto en openbaar vervoer. Colloquium Vervoersplanologisch Speurwerk 1990 - meten - modelleren - monitoren - nieuwe ontwikkelingen in onderzoeksmethoden, Delft, C.V.S.
- CPB (1997) Economie en fysieke omgeving. Beleidsopgaven en oplossingsrichtingen 1995-2020, Centraal PlanBureau, Sdu Uitgevers, Den Haag
- Dargay J; Gatley D (1998) Vehicle ownership to 2015: implications for energy use and emissions. Energy Policy Special Issue: Transport Futures: Long Term Perspectives and Implications, Vol. 25(No. 14-15), pp. 1121-1127.
- Dargay J; Gatley D (1999) Income's effect on car and vehicle ownership, worldwide: 1960-2015. Transportation Research Part A, Vol. 33, pp. 101-138.
- Dings JMW; Metz D; Leurs BA; Bleijenberg AN (1999) Beter aanbod, meer goederenvervoer?, CE, Delft
- ECN (1998) Nationale Energieverkenningen 1995-2020, Trends en thema's, rapportnr. ECN-C--97-081, Energieonderzoekscentrum Nederland, maart 1998
- ECN/RIVM (1998) Optiedocument voor emissiereductie van broeikasgassen, Energieonderzoekscentrum Nederland/ Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu, Petten/Bilthoven, oktober 1998
- ECN/RIVM (2000) Definitiestudie kennisinstrumentarium voor energie en emissies; verkenning naar de opbouw van een gezamenlijke kennisstructuur voor RIVM en ECN, rapportnr. ECN-RIVM/00-002, Energieonderzoekscentrum Nederland/ Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu, Petten/Bilthoven, september 2000
- Geurs KT; Wee GP van (1997) Effecten van prijsbeleid op verkeer en vervoer, Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM), Bilthoven, RIVM-rapport 773002005
- Geurs KT; Brink RMM van den; Annema JA; Wee GP van (1998) Verkeer en vervoer in de Nationale Milieuverkenning 4, Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM), Bilthoven, RIVM-rapport 773002011
- Gijzen A; Brink RMM van den (2002) Het spoor in model: energiegebruik en emissies door het railvervoer: beschrijving en toepassing van het model PRORIN, Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM), Bilthoven, RIVM-rapport 773002021
- Havenith C (1995) Emissionsverhalten von Nutzfahrzeugmotoren bei Verwendung von Pflanzenölen, VDI Berichte 885, pp. 129-144, VDI-Gesellschaft Fahrzeugtechnik, Düsseldorf
- Hoff AF; Dings JMW; Dijkstra WJ (2001) Prijsgevoeligheid in de luchtvaart en zeescheepvaart, CE, Delft
- Johansson B (1999) The economy of alternative fuels when including the cost of air pollution, Transportation Research Part D, pp. 91-108
- Kasifa SC (2002) Scheepvaart en Milieu, Mogelijkheden voor emissiereductie, Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM), Bilthoven, RIVM rapport 773002019
- Klimstra (1990) Aardgas als voertuigbrandstof, Energie Consulent, nr. 2, pp. 5-9
- May H; Hattingen U; Klee P, Spitz M (1997) Vergleichende Emissionsuntersuchungen beim Betrieb verschiedener Dieselmotoren mit Dieselkraftstoff und Rapsölmethylester, Motortechnische Zeitschrift (MTZ), Vol. 58, pp. 42-50

- Michaelis L (1995) The abatement of Air Pollution from Motor Vehicles; the role of alternative fuels, *Journal of Transport Economics and Policy*, January 1995, pp. 71-84
- Muhl W; Petra H (1992) Entwicklung eines BMW-Fahrzeuges für flexiblen Benzin-Methanol-Mischbetrieb, *Automobiltechnische Zeitschrift (ATZ)*, Vol. 94, pp. 80-86
- NEA (2001), *Vergelijkingskader modaliteiten*, Rijswijk: NEA
- NOVEM (2002) *Voortgangsrapportage ontwikkeling energie-efficiency in de MJA met NV Nederlandse Spoorwegen*, NOVEM, Utrecht, februari 2002
- NS (2000) *Jaarverslag 1999*, Nederlandse Spoorwegen, Utrecht
- OECD/IEA (1999) *Automotive fuels for the future: the search for alternatives*, International Energy Agency (IEA), Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD), Paris
- Pischinger (1998) The Diesel Engine for Cars - Is There a Future?, *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol. 120, July 1998, pp. 641-647
- RIVM (2000) *Nationale Milieuverkenning 5 2000-2030*, Samsom, Alphen aan den Rijn
- Sams TH; Schindlbauer H (1992) *Untersuchungen über den Betrieb von Dieselmotoren mit Rapsmethylester*, Proceedings Symposium Rapsmethylester Kraftstoff und Rohstoff, Vienna, October, 1992
- V&W (2001) *Nationaal Verkeers- en Vervoersplan 2001-2020 (NVVP)*, Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Den Haag, mei 2001
- Verbeek RP; Doorn A van (1996) *Global assessment of Dimethyl-ether as an automotive fuel*, TNO Road Vehicles Research Institute, Delft, July 1996
- VROM (1999) *Uitvoeringsnota Klimaatbeleid; deel I: Binnenlandse Maatregelen*, Ministerie van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieu, Den Haag, juni 1999
- Walwijk M van; Bückmann M; Troelstra WP; Achten PAJ (1996) *Automotive fuels survey, part 2: Distribution and Use*, INNAS/Atrax Energi AB, Breda/Göteborg, december 1996.
- Weide J van der (1990) *Aardgas als motorbrandstof*, *Energiespectrum*, april 1990, pp. 98-104
- Weiss MA; Heywood JB; Drake EM; Schafer A; AuYeung FF (2000) *On the road in 2020; a life-cycle analysis of new automobile technologies*, Energy Laboratory, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge

## Bijlage 1 Verzendlijst

- 1 DGM, Directie Strategie en Bestuur, Mr. Ing. J.H. Enter
- 2 Directeur-Generaal Milieubeheer, Ir. J. van der Vlist
- 3 Dr. C.M. Plug – VROM/LMV/DIR
- 4 Drs H.C.G.M. Brouwer – VROM/LMV/MOVE
- 5 Drs. R. Bouman – VROM/LMV/MOVE
- 6 Dr. J.F.M. van der Waals – VROM/LMV/MOVE
- 7 Ir P.C.M. Polak – RWS-AVV
- 8 Mevr. J. Veurman – RWS-AVV
- 9 Ing. J.A.P. Klein – CBS
- 10 Ir. J.J.E.A van Meel – NOVEM
- 11 Ir. P. Kroon – ECN
- 12 Ir. W. J. van Grondelle – SNM
- 13 Ir. N.L.J. Gense – TNO-WT
- 14 Ir. J.H.J. Hulskotte – TNO-MEP
- 15 Ing. P.M. Peeters – Peeters advies
- 16 Ir. J.M.W. Dings – CE
- 17 Depot van Nederlandse Publikaties. Afdeling Aquisitie
- 18 Nederlands Instituut voor Wetenschappelijke Informatiediensten
- 19 Bibliotheek VU
- 20 Bibliotheek UvA
- 21 Bibliotheek Faculteit der Economische Wetenschappen en Econometrie – UvA
- 22 Bibliotheek SEO
- 23 Bibliotheek RPD
- 24 Bibliotheek V&W
- 25 Bibliotheek AVV
- 26 Bibliotheek TU Delft
- 27 Bibliotheek TU Eindhoven
- 28 Bibliotheek TU Twente
- 29 Bibliotheek RUU
- 30 Bibliotheek KUN
- 31 Bibliotheek NHTV
- 32 Connekt
- 33 Directie RIVM
- 34 Ir F. Langeweg
- 35 Dr. M.A.J. Kuijpers-Linde
- 36 Drs. J.A. Annema
- 37 Drs. A. Hoen
- 38 Drs. J. A. Oude Lohuis
- 39 Drs. R.A. van den Wijngaart
- 40 Drs. A. Gijsen
- 41-42 Auteurs
- 43 SBC/Communicatie
- 44 Bibliotheek RIVM
- 45-47 Bureau Rapportenbeheer
- 48 Bureau Rapportenregistratie
- 49-60 Reserve-exemplaren



## Bijlage 2 Emissiefactoren in PIE-VeV

Tabel BI.1: NO<sub>x</sub>-emissies per eenheid van brandstofverbruik ter plaatse van het voertuig

NO <sub>x</sub>	1995	2000	2010	2020	2030
<b>PERSONENVERVOER</b>	[g/GJ]				
personenauto					
IC benzine	0,54	0,33	0,05	0,04	0,04
IC diesel	0,27	0,23	0,16	0,13	0,13
IC LPG	0,38	0,29	0,08	0,06	0,06
IC CNG	0,54	0,33	0,05	0,04	0,04
IC alcohol	0,38	0,23	0,04	0,03	0,03
IC biodiesel	0,29	0,24	0,17	0,14	0,13
IC DME	0,05	0,05	0,03	0,03	0,03
FC waterstof / FC benzine / elektrisch	0	0	0	0	0
autobus					
IC diesel	1,18	0,91	0,41	0,27	0,27
IC LPG	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27
IC CNG	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27
IC alcohol	0,71	0,55	0,25	0,16	0,16
IC biodiesel	1,29	1,00	0,45	0,30	0,30
IC DME	0,53	0,41	0,19	0,12	0,12
FC waterstof / FC benzine / elektrisch	0	0	0	0	0
trein					
elektrisch	0	0	0	0	0
IC diesel	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82
IC CNG	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22
<b>GOEDERENVERVOER</b>					
bestelauto					
IC benzine	0,78	0,28	0,04	0,03	0,03
IC diesel	0,28	0,26	0,15	0,11	0,11
IC LPG	0,75	0,25	0,07	0,05	0,05
IC CNG	0,78	0,28	0,04	0,03	0,03
IC alcohol	0,55	0,19	0,03	0,02	0,02
IC biodiesel	0,30	0,27	0,16	0,11	0,11
IC DME	0,06	0,05	0,03	0,02	0,02
FC waterstof / FC benzine / elektrisch	0	0	0	0	0
vrachtauto / trekker-oplegger					
IC diesel	0,98	0,75	0,34	0,22	0,22
IC LPG	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22
IC CNG	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22
IC alcohol	0,59	0,45	0,20	0,13	0,13
IC biodiesel	1,08	0,82	0,37	0,24	0,24
IC DME	0,44	0,34	0,15	0,10	0,10
FC waterstof / FC benzine / elektrisch	0	0	0	0	0
binnenvaartschip					
IC diesel	1,39	1,39	1,36	1,26	1,26
IC LPG	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22
IC CNG	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22
IC alcohol	0,83	0,83	0,81	0,75	0,75
IC biodiesel	1,53	1,53	1,49	1,38	1,38
IC DME	0,63	0,63	0,61	0,57	0,57
FC waterstof / FC benzine / elektrisch	0	0	0	0	0
trein					
elektrisch	-	-	-	-	-
IC diesel	1,59	1,59	1,59	1,59	1,59
IC CNG	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22

Tabel B1.2: NMVOS-emissies per eenheid van brandstofverbruik ter plaatse van het voertuig (inclusief verdamping)

NMVOS	1995	2000	2010	2020	2030
<b>PERSONENVERVOER</b>	[g/GJ]				
personenauto					
IC benzine	0,54	0,32	0,12	0,11	0,11
IC diesel	0,06	0,05	0,03	0,02	0,02
IC LPG	0,18	0,12	0,05	0,03	0,03
IC CNG	0,05	0,03	0,01	0,01	0,01
IC alcohol	0,32	0,19	0,07	0,06	0,07
IC biodiesel	0,05	0,04	0,02	0,01	0,01
IC DME	0,03	0,02	0,01	0,01	0,01
FC waterstof / FC benzine / elektrisch	0	0	0	0	0
autobus					
IC diesel	0,20	0,11	0,04	0,04	0,04
IC LPG	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
IC CNG	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
IC alcohol	0,20	0,11	0,04	0,04	0,04
IC biodiesel	0,16	0,09	0,04	0,03	0,03
IC DME	0,09	0,05	0,02	0,02	0,02
FC waterstof / FC benzine / elektrisch	0	0	0	0	0
trein					
elektrisch	0	0	0	0	0
IC diesel	0,11	0,11	0,11	0,11	0,11
IC CNG	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
<b>GOEDERENVERVOER</b>					
bestelauto					
IC benzine	0,81	0,30	0,12	0,10	0,11
IC diesel	0,07	0,04	0,01	0,01	0,01
IC LPG	0,45	0,10	0,04	0,02	0,02
IC CNG	0,08	0,03	0,01	0,01	0,01
IC alcohol	0,48	0,18	0,07	0,06	0,06
IC biodiesel	0,06	0,03	0,01	0,00	0,00
IC DME	0,04	0,02	0,00	0,00	0,00
FC waterstof / FC benzine / elektrisch	0	0	0	0	0
vrachtauto / trekker-oplegger					
IC diesel	0,10	0,05	0,02	0,02	0,02
IC LPG	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
IC CNG	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
IC alcohol	0,10	0,05	0,02	0,02	0,02
IC biodiesel	0,08	0,04	0,02	0,02	0,02
IC DME	0,05	0,02	0,01	0,01	0,01
FC waterstof / FC benzine / elektrisch	0	0	0	0	0
binnenvaartschip					
IC diesel	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07
IC LPG	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
IC CNG	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
IC alcohol	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07
IC biodiesel	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
IC DME	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
FC waterstof / FC benzine / elektrisch	0	0	0	0	0
trein					
elektrisch	-	-	-	-	-
IC diesel	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
IC CNG	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01

Tabel B1.3: PM<sub>10</sub>-emissies door verbranding per eenheid van brandstofverbruik ter plaatse van het voertuig  
(exclusief slijtage)

<b>PM10-verbranding</b>	1995	2000	2010	2020	2030
<b>PERSONENVERVOER</b>	[g/GJ]				
personenauto					
IC benzine	0,006	0,003	0,002	0,002	0,002
IC diesel	0,072	0,048	0,016	0,008	0,008
IC LPG	0,003	0,002	0,002	0,002	0,002
IC CNG	0,004	0,002	0,002	0,002	0,002
IC alcohol	0,003	0,002	0,001	0,001	0,001
IC biodiesel	0,072	0,048	0,016	0,008	0,008
IC DME	0,006	0,003	0,002	0,002	0,002
FC waterstof / FC benzine / elektrisch	0	0	0	0	0
autobus					
IC diesel	0,101	0,043	0,015	0,012	0,012
IC LPG	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003
IC CNG	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003
IC alcohol	0,020	0,009	0,003	0,002	0,002
IC biodiesel	0,091	0,039	0,013	0,010	0,010
IC DME	0,036	0,015	0,005	0,004	0,004
FC waterstof / FC benzine / elektrisch	0	0	0	0	0
trein					
elektrisch	0	0	0	0	0
IC diesel	0,070	0,070	0,070	0,070	0,070
IC CNG	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
<b>GOEDERENVERVOER</b>					
bestelauto					
IC benzine	0,012	0,003	0,002	0,002	0,002
IC diesel	0,073	0,053	0,012	0,008	0,008
IC LPG	0,004	0,002	0,002	0,002	0,002
IC CNG	0,008	0,002	0,001	0,001	0,001
IC alcohol	0,006	0,001	0,001	0,001	0,001
IC biodiesel	0,073	0,053	0,012	0,008	0,008
IC DME	0,012	0,003	0,002	0,002	0,002
FC waterstof / FC benzine / elektrisch	0	0	0	0	0
vrachtauto / trekker-oplegger					
IC diesel	0,051	0,020	0,006	0,005	0,005
IC LPG	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
IC CNG	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
IC alcohol	0,010	0,004	0,001	0,001	0,001
IC biodiesel	0,046	0,018	0,006	0,005	0,004
IC DME	0,018	0,007	0,002	0,002	0,002
FC waterstof / FC benzine / elektrisch	0	0	0	0	0
binnenvaartschip					
IC diesel	0,097	0,097	0,097	0,097	0,097
IC LPG	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003
IC CNG	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
IC alcohol	0,019	0,019	0,019	0,019	0,019
IC biodiesel	0,087	0,087	0,087	0,087	0,087
IC DME	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034
FC waterstof / FC benzine / elektrisch	0	0	0	0	0
trein					
elektrisch	-	-	-	-	-
IC diesel	0,023	0,023	0,023	0,023	0,023
IC CNG	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001

Tabel B1.4: PM<sub>10</sub>-emissies door slijtage per eenheid van brandstofverbruik ter plaatse van het voertuig

PM10-slijtage	1995	2000	2010	2020	2030
<b>PERSONENVERVOER</b>	[g/GJ]				
personenauto					
IC benzine	0,005	0,005	0,006	0,007	0,006
IC diesel	0,005	0,006	0,007	0,007	0,007
IC LPG	0,005	0,005	0,007	0,008	0,008
overige aandrijfconcepten	0,005	0,005	0,006	0,007	0,006
autobus					
alle aandrijfconcepten	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004
trein					
elektrisch	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005
IC diesel /CNG	0	0	0	0	0
<b>GOEDERENVERVOER</b>					
bestelauto					
IC benzine	0,005	0,005	0,006	0,007	0,007
IC diesel	0,005	0,005	0,006	0,006	0,006
overige aandrijfconcepten	0,005	0,005	0,006	0,006	0,006
vrachtauto / trekker-oplegger					
alle aandrijfconcepten	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006
binnenvaartschip					
alle aandrijfconcepten	0	0	0	0	0
trein					
elektrisch	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005
IC diesel /CNG	0	0	0	0	0

Tabel B1.5: SO<sub>2</sub>-emissies door slijtage per eenheid van brandstofverbruik ter plaatse van het voertuig

SO <sub>2</sub>	1995	2000	2010	2020	2030
<b>PERSONENVERVOER</b>	[g/GJ]				
personenauto					
IC benzine	0,004	0,004	0,002	0,002	0,002
IC diesel	0,071	0,016	0,002	0,002	0,002
overige aandrijfconcepten	0	0	0	0	0
autobus					
IC diesel	0,071	0,016	0,002	0,002	0,002
alle aandrijfconcepten	0	0	0	0	0
trein					
elektrisch	0	0	0	0	0
IC diesel	0,080	0,080	0,080	0,080	0,080
IC CNG	0	0	0	0	0
<b>GOEDERENVERVOER</b>					
bestelauto					
IC benzine	0,004	0,004	0,002	0,002	0,002
IC diesel	0,071	0,016	0,002	0,002	0,002
overige aandrijfconcepten	0	0	0	0	0
vrachtauto / trekker-oplegger					
IC diesel	0,071	0,016	0,002	0,002	0,002
overige aandrijfconcepten	0	0	0	0	0
binnenvaartschip					
IC diesel	0,080	0,080	0,047	0,047	0,047
overige aandrijfconcepten	0	0	0	0	0
trein					
elektrisch	0	0	0	0	0
IC diesel	0,080	0,080	0,080	0,080	0,080
IC CNG	0	0	0	0	0