

RIJKSINSTITUUT VOOR VOLKSGEZONDHEID EN MILIEU
BILTHOVEN

RIVM-rapport nr. 773002 007

Energiegebruik en emissies per vervoerwijze

R.M.M. van den Brink, G.P. van Wee

mei 1997

Dit onderzoek is verricht in het kader van het project 'Verkeer en Vervoer', projectnr. 773002, dat in opdracht van het Directoraat-Generaal Milieubeheer aan het RIVM wordt uitgevoerd.

Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu, Postbus 1, 3720 BA, Bilthoven
tel. 030-2749111, fax 030-2742971

VERZENDLIJST

- 1 DGM, Directie Strategische Planning
- 2 plv. Directeur-Generaal Milieubeheer, Dr Ir B.C.J. Zoeteman

- 3 Dipl. Ing. J.J.M. Henssen - VROM/DGM
- 4 Ir H.L. Baarbé - VROM/DGM
- 5 Ir J. Polman - VROM/DGM
- 6 Drs C.J. Sliggers - VROM/DGM
- 7 Mr. M.C. Kroon - VROM/DGM
- 8 Drs P.F.J. van der Most - TNO-Apeldoorn
- 9 Ir J.H.J. Hulskotte - TNO-MEP
- 10 Dr J.J.M. Berdowski - TNO-MEP
- 11 Ir R.C. Rijkeboer - TNO-WT
- 12 Ir J.W.C.M. van de Venne - TNO-WT
- 13 W.A.M. den Tonkelaar - TNO-MW
- 14 Drs J.F.A.M. ten Berg - NS Technisch Onderzoek
- 15 Dhr H. van Oostroom - NS-Reizigers
- 16 Ir P. Kroon - ECN
- 17 Dr Ir B.J.C.M. Rutten - AVV
- 18 Dhr. Th. Cool - AVV
- 19 Ing. J.A.P. Klein - CBS-Voorburg
- 20 Ir P. Janse - CE
- 21 Ir J.M.W. Dings - CE
- 22 Dr G. van Ootmarssen - NOVEM
- 23 Dhr W.A. Vrakking - CMG
- 24 Dhr H. Frouws - Bureau van Heugten
- 25 Bibliotheek Technische Universiteit Eindhoven
- 26 Bibliotheek Technische Universiteit Delft
- 27 Bibliotheek VROM
- 28 Bibliotheek V&W
- 29 Bibliotheek AVV

- 30 Directie RIVM
- 31 Ir F. Langeweg - RIVM/SB5
- 32 Drs L.H.M. Koshiek - RIVM/LAE
- 33 Dr G.P. van Wee - RIVM/LAE
- 34 Drs J.A. Annema - RIVM/LAE
- 35 Drs Ing. K.T. Geurs - RIVM/LAE
- 36 Drs J.G.J. Olivier - RIVM/LAE
- 37 Dr R. Thomas - RIVM/LAE
- 38 Drs J.P.M. Ros - RIVM/LAE

- 38-39 Auteurs
- 40 Hoofd Bureau Voorlichting en Public Relations
- 41 Bibliotheek RIVM/LAE
- 42 Bibliotheek RIVM/LLO
- 43 Bibliotheek RIVM/MNV
- 44 Bibliotheek RIVM
- 45 Bureau rapportenregistratie
- 46-75 Bureau rapportenbeheer
- 76-100 Reserve exemplaren LAE

VOORWOORD

Dit rapport bevat de neerslag van een onderzoek dat in het kader van het project 'Verkeer en Vervoer' in opdracht van het Directoraat-Generaal Milieubeheer bij het RIVM wordt uitgevoerd.

Dit rapport is mede tot stand gekomen door de actieve inzet van Dipl. Ing. J.J.M. Henssen (VROM/DGM) en Dr Ir B.J.C.M. Rutten (V&W/AVV). Onze dank is aan beiden voor het kritisch becommentariëren van het conceptrapport.

SUMMARY

This report, written by order of the Ministry of Housing, Spatial Planning and Environment, forms the basis of a realistic comparison of energy-efficiency and emissions of the different passenger and freight transport modes. Besides this report will pay much attention to the effects on energy use and emissions of a modal shift. It will also be used as a foundation of the AVV-project EEB (Energy efficiency, Emission factors and Fuel efficiency). In this project a database containing energy-efficiencies and emission factors of traffic and transport will be developed for the past, the present and the future.

The energy use and emissions per passenger kilometre of passenger cars, busses, trams/metro's and passenger trains are compared. Aviation is not involved in the comparison because of the fact that only inland transport is considered.

The energy use and emissions resulting from the production of fuels and electricity are involved in the calculations. The preceding stage, i.e. the winning and transportation of fuels, is not considered.

Freight transport by light trucks, heavy trucks, rail transport and inland shipping is compared regarding energy use and emissions per tonne kilometre. Aviation is not considered because of the low share in total inland freight transport. Energy use and emissions resulting from the production of fuels and electricity are involved in the calculations.

The main conclusions are:

- Calculation of the effects on emissions and energy use of a modal shift can result in drawing the wrong conclusions when only differences in energy use and emissions between transport modes are concerned. Even when passenger cars use less energy per passenger kilometre than busses or trains, a shift from car towards bus or train generally decreases energy use by passenger transport.
- Comparing energy use and emissions per transport mode, not only variables like occupancy rate play a role, also the ramification of the infrastructure has to be considered.
- Knowledge of the coverage of data concerning emissions and energy use (for example: is electricity production included or excluded?) is necessary to provide a realistic comparison of transport modes.
- There are few data available on indirect energy use and emissions (as a result of for example car manufacturing) so that a comparison of transport modes included indirect energy use and emissions is not feasible.

- Comparisons of transport modes on a basis of average values can lead to other conclusions than those based on specific values (average truck versus heavy truck, average car versus company car).
- Passenger transport by electric trains has the lowest emission factors in 1995 compared to the other passenger transport modes. The city bus has a slightly higher energy efficiency than the passenger car used for city trips. The emissions of NO_x and particles from the city bus are 3 times as high as those from the passenger car. The touring bus has the highest energy efficiency followed by electric rail transport.
- The above-mentioned results may not be explained as if it were better to promote the passenger car than the citybus. Every increase in city bus use at the cost of passenger car use leads, at the current occupation rates, to an avoided emission and energy use as large as the emission and energy use of a passenger car. Besides a modal shift from passenger car to public transport increases the occupation rates of public transport and decreases the environmental pollution per passenger kilometre of public transport.
- As a result of further strengthening of emission standards for road traffic combined with the delay of emission standards for diesel passenger trains, the environmental lead of electric passenger transport is declining.
- With the current differences in type of transported cargo, freight transport by road vehicles is 2 till 2.5 times less energy efficient as inland shipping or rail transport. The same can, however, be concluded when transportation of similar goods (containers) by the different modes is concerned. The emissions from electric rail transport are much lower than those from inland shipping of road transport.
- In view of the coming strengthening of the emission standards for road vehicles combined with the delay of emission standards for freight trains (with diesel engines) and inland ships, the gap between road and rail freight transport will be much smaller in 2010.

SAMENVATTING

Dit rapport, dat in opdracht van VROM/DGM-Directie Geluid en Verkeer is geschreven, heeft als doel de basis te leggen voor een realistische vergelijking tussen verschillende personen- en goederenvervoerswijzen voor wat betreft energiegebruiks- en emissiefactoren. Bovendien zal in dit rapport veel aandacht worden besteed aan de effecten op energiegebruik en emissies van een verschuiving in de modal mix. Daarnaast heeft het als doel een onderbouwing te leveren aan het AVV-project EEB (Energie-, Emissie- en Brandstoffactoren). In dit project wordt een database ontwikkeld met energie-, emissie- en brandstoffactoren van verkeer en vervoer voor het verleden, heden en de toekomst.

Voor wat betreft personenvervoer zijn het energiegebruik en emissies per reizigerkilometer door personenauto's, autobussen, trams/metro's en personentreinen in 1995 met elkaar vergeleken. Luchtvaart is niet betrokken in de vergelijking gezien het feit dat alleen binnenlands personenvervoer is beschouwd. Het energiegebruik en de emissies per reizigerkilometer in 2010 zijn afgeleid van de uitkomsten van de knelpuntenanalyse die ten behoeve van de MV4 is uitgevoerd.

Het energiegebruik en de emissies als gevolg van de productie van brandstof en elektriciteit zijn in de energie- en emissiefactoren verrekend. Het traject voorafgaand aan de productie van brandstof en elektriciteit wordt niet in beschouwing genomen.

Voor wat betreft goederenvervoer zijn het energiegebruik en emissies per tonkilometer door bestelauto's, vrachtauto's/trekkers, goederenrailvervoer en binnenvaart in 1995 met elkaar vergeleken. Luchtvaart is ook hier niet betrokken in de vergelijking gezien het feit dat alleen binnenlands goederenvervoer is beschouwd en het aandeel van de luchtvaart in het totale binnenlands goederenvervoer gering is. Ook in dit geval zijn het energiegebruik en de emissies als gevolg van de productie van brandstof en elektriciteit in de energie- en emissiefactoren verrekend. De vergelijking tussen energiegebruik en emissies per tonkilometer voor de verschillende goederenvervoerswijzen in 2010 is gebaseerd op de knelpuntenanalyse die ten behoeve van de MV4 is uitgevoerd.

De voornaamste conclusies zijn:

- Berekening van de effecten op energiegebruik en emissies van een verschuiving van auto naar bus of trein leidt tot verkeerde conclusies wanneer alleen de onderlinge verschillen in energiegebruik en emissies per reizigerkilometer worden beschouwd. Zelfs wanneer de auto voor wat energiegebruik en emissies per reizigerkilometer betreft beter presteert dan de bus of trein, zal een verschuiving van auto naar bus of trein doorgaans de totale energiebehoefte van en de emissies door personenvervoer doen afnemen. Alleen een zorgvuldige analyse van de werkelijk

- optredende veranderingen leidt tot verantwoorde uitspraken omtrent de effecten van verschuivingen tussen personenvervoerwijzen.
- In de vergelijking tussen energiegebruik en emissies per vervoerwijze spelen naast de gebruikelijke determinanten als bezettings- en beladingsgraad ook andere determinanten zoals bijvoorbeeld de grofmazigheid van infrastructuur een rol.
 - De reikwijdte van in de literatuur aangetroffen energie- en emissiefactoren (bijvoorbeeld inclusief of exclusief raffinage) is belangrijk wanneer op basis daarvan verschillende vervoerwijzen met elkaar vergeleken worden.
 - Er is weinig informatie beschikbaar over indirect energiegebruik en indirecte emissies (ten gevolge van o.a. de productie van vervoermiddelen) zodat een vergelijking tussen vervoerwijzen met inbegrip van indirect energiegebruik en indirecte emissies niet haalbaar is.
 - Vergelijkingen tussen vervoerwijzen op basis van gemiddelde waarden kunnen andere resultaten opleveren dan die op basis van gedesaggregeerde waarden (gemiddelde vrachtauto versus vrachtauto > 20 ton; gemiddelde personenauto versus personenauto voor woon-werkverkeer).
 - Het elektrisch personenvervoer (tram/metro/trein) blijkt anno 1995 energiezuiniger en heeft lagere emissiefactoren dan alle andere beschouwde vormen van gemotoriseerd personenvervoer. De stadsbus scoort bij de huidige bezettingsgraad voor wat betreft gemiddeld energiegebruik iets beter dan de personenauto in de stad, de stadsbus emitteert gemiddeld echter wel 3 maal zoveel NO_x en deeltjes dan de personenauto. De touringcar heeft van alle beschouwde personenvervoerwijzen het laagste energiegebruik per reizigerkilometer.
 - Bovenstaande resultaten mogen echter niet tot de conclusie leiden dat voor stadsvervoer beter de personenauto kan worden gestimuleerd dan het stadsbusvervoer. Iedere toename van het gebruik van stadbussen ten koste van het personenautogebruik leidt bij de huidige bezettingsgraad van stadsbusvervoer tot een vermeden energiegebruik en emissie ter grootte van het energiegebruik en de emissies die gepaard gaan met het personenautogebruik. Bovendien zullen de van auto naar stadsbus overstappende stadsreizigers de bezettingsgraad van stadbussen doen stijgen zodat de stadsbus per reizigerkilometer minder energie gebruikt en minder emitteert. Hetzelfde kan natuurlijk gesteld worden voor de effecten van een verschuiving van de personenauto naar andere vormen van openbaar vervoer.
 - Wanneer verondersteld wordt dat de voorgenomen aanscherping van de emissienormering voor wegverkeer wordt doorgevoerd en dat emissienormering voor diesel-elektrische treinen in de periode 1995-2010 niet van de grond komt, zal de milieuwinst van elektrisch railvervoer (bij constanthouding van het aandeel diesel-elektrische treinkilometers) ten opzichte van wegverkeer in 2010 kleiner zijn dan in 1995.
 - Het goederenwegvervoer door vrachtwagens en trekkers gebruikt anno 1995 ca. 2 tot 2.5 maal zoveel energie per tonkilometer als de binnenvaart en het goederenrailvervoer bij de huidige verschillen in de aard van de door de verschillende ver-

voerwijzen vervoerde goederen. Dezelfde conclusie blijkt ook te gelden als gekeken wordt naar het vervoer van gelijksoortige lading (= containers) door verschillende goederenvervoerwijzen. De emissies van elektrisch goederenrailvervoer zijn zeer veel lager dan die van goederenwegvervoer en binnenvaart. In energiegebruik en CO₂-emissie ontlopen elektrisch goederenvervoer en binnenvaart elkaar slechts weinig.

- Gezien de snelle aanscherping van de emissiewetgeving voor vrachtwagens en trekkers en het achterblijven van emissiewetgeving bij het goederenrailvervoer en de binnenvaart, zal het milieunadeel van het goederenwegvervoer bij de huidige beleidsvoornemens in de toekomst afnemen.

INHOUDSOPGAVE

VERZENDLIJST.....	3
VOORWOORD.....	5
SUMMARY	7
SAMENVATTING	9
1. INLEIDING	15
2. DETERMINANTEN VOOR ENERGIEGEBRUIK EN EMISSIES	19
2.1. Inleiding	19
2.2. Determinanten	19
2.2.1. Technische determinanten	19
2.2.2. Operationele determinanten	25
2.3. Reikwijdte van gegevens.....	28
3. PERSONENVERVOER	31
3.1. Inleiding	31
3.2. Personenauto's	32
3.3. Bussen	38
3.4. Trams/Metro's.....	43
3.5. Personentreinen	45
3.6. Vergelijking tussen personenvervoerwijzen in 1995	50
3.7. Vergelijking tussen personenvervoerwijzen in 2010	55
4. GOEDERENVERVOER.....	57
4.1. Inleiding	57
4.2. Bestelauto's	57
4.3. Vrachtauto's en Trekkers	60
4.4. Goederentreinen	68
4.5. Binnenvaartschepen	71
4.6. Vergelijking tussen goederenvervoerwijzen in 1995	73
4.7. Vergelijking tussen goederenvervoerwijzen in 2010	76
5. CONCLUSIES.....	79
LITERATUUR	87

1. INLEIDING

Op verzoek van het Directoraat-Generaal Milieubeheer (DGM) van het ministerie van Volkshuisvesting Ruimtelijke Ordening en Milieu (VROM), Directie Geluid en Verkeer, is een literatuurstudie uitgevoerd naar energiegebruik en emissies van diverse stoffen per vervoerprestatie per vervoerwijze voor personen- en goederenvervoer. Het literatuuronderzoek is - conform de wensen van DGM en de Adviesdienst Verkeer en Vervoer (AVV) van Rijkswaterstaat - gekoppeld aan het EEB-project (Emissie-, Energie- en Brandstoffactoren) dat in opdracht van de AVV wordt uitgevoerd. De eerste fase daarvan is uitgevoerd door Cap Volmac en Infoplan. Doel van EEB is te voorzien in vlot toegankelijke, hanteerbare en eenduidige gegevens over emissie-, energie- en brandstoffactoren van verkeer en vervoer voor het verleden, heden en de toekomst. EEB zal als ondersteuning bij beleidsadvisering gaan dienen.

Het onderhavige rapport vervult daarmee twee functies:

- Het is een zelfstandig leesbaar rapport waarin de gevonden literatuur omtrent energiegebruik en emissies per vervoerwijze wordt behandeld.
- Het is een achtergronddocument bij het informatiesysteem EEB.

Zowel personen- als goederenvervoer komen afzonderlijk aan bod. Doel van dit rapport is om aan te geven wat op dit moment de meest realistische waarden zijn voor het energiegebruik en de emissies per reiziger- en tonkilometer van de verschillende personen- en goederenvervoerwijzen en hoe deze waarden in de toekomst zullen wijzigen. Het basisjaar van de vergelijking is 1995 en ontwikkelingen in de toekomst worden beschreven tot 2010. Een tweede doel is de invloed op het energiegebruik en de emissies in te schatten van een verschuiving naar andere vervoerwijzen. Een belangrijk aspect hierbij is het in ogenschouw nemen van de werkelijke veranderingen die plaatsvinden bij een verschuiving tussen vervoerwijzen. Wat emissiefactoren betreft worden de factoren voor CO₂, CO, NO_x, VOS, SO₂ en deeltjes geïnventariseerd.

Zoals gesteld is de grootte waarmee het energiegebruik en de emissies door de vervoerwijzen met elkaar worden vergeleken voor het personenvervoer de reizigerkilometer (rkm) en voor goederenvervoer de tonkilometer (tonkm). Het energiegebruik en de emissies als gevolg van de productie van brandstoffen en elektriciteit zijn verrekend in het energiegebruik en de emissies door de vervoerwijzen. De term die hiervoor in het vervolg van dit rapport wordt gebruikt is 'well to wheel'. Het traject voorafgaande aan de productie van brandstoffen en elektriciteit, de winning en transport naar raffinaderij of elektriciteitscentrale, is niet betrokken in de vergelijking. Ook energiegebruik en emissies als gevolg van de productie van vervoermiddelen, infrastructuur en het onderhoud en de verwijdering daarvan (indirect energiegebruik en indirecte emissies) zijn niet verrekend.

Hoofdstuk 2 moet beschouwd worden als een analyse van de factoren die het energiegebruik en de emissies door de verschillende vervoerwijzen bepalen. Dit om duidelijk te maken wat de invloed van een eventuele verandering van de determinanten in de toekomst op de huidige (1995) energie- en emissiefactoren van de verschillende personen- en goederenvervoerwijzen is. Daarnaast wordt in dit hoofdstuk aangegeven welke aspecten een rol spelen bij het vergelijken van vervoerwijzen. Bovendien wordt de reikwijdte van literatuurgegevens besproken. Deze speelt een belangrijke rol in het interpreteren van gegevens met betrekking tot energiegebruik en de emissies uit verschillende literatuurbronnen. Met de reikwijdte van gegevens wordt bijvoorbeeld bedoeld of gegevens betrekking hebben op alleen het energiegebruik en de emissies als gevolg van het voortbewegen van een vervoermiddel, of ook op het energiegebruik en de emissies als gevolg van het produceren van brandstof, of ook op het energiegebruik en de emissies als gevolg van de productie, onderhoud en verwijdering van het vervoermiddel en de voor het gebruik vereiste infrastructuur.

In hoofdstuk 3 is per vervoerwijze een afleiding gegeven van de energie- en emissiefactoren van verschillende personenvervoerwijzen in 1995 en wordt uiteengezet wat de verwachte ontwikkelingen tot 2010 zijn. In hoofdstuk 4 is hetzelfde gedaan voor goederenvervoerwijzen. Met behulp van deze gegevens en gegevens met betrekking tot passagierscapaciteit en bezettingsgraad (voor personenvervoer) en laadvermogen en beladingsgraad naar inhoud (voor goederenvervoer) kunnen de energie- en emissiefactoren per reizigers- resp. tonkilometer worden bepaald. Het rapport vermeldt naast energie- en emissiefactoren die betrekking hebben op het energiegebruik en de emissies door het vervoermiddel ook energie- en emissiefactoren waarin het energiegebruik en de emissies als gevolg van de productie van de verbruikte brandstof en elektriciteit zijn verrekend.

In paragraaf 3.6. resp. 4.6 komt de vergelijking van de verschillende personen- resp. goederenvervoerwijzen voor wat betreft energie- en emissiefactoren per reizigers- resp. tonkilometer in 1995 en 2010 aan de orde. Met de gegevens in deze paragrafen kan de invloed op het energiegebruik en de emissies van een verschuiving tussen vervoerwijzen gekwantificeerd worden. Bij het kwantificeren van deze invloed moet niet zozeer gekeken worden naar de verschillen tussen de milieuprestatie van de verschillende vervoerwijzen maar juist naar de werkelijk optredende veranderingen. Een voorbeeld voor dit laatste: één personenautomobilist die zijn auto verruilt voor de stadsbus leidt tot een reductie van het energiegebruik door personenvervoer ter grootte van het energiegebruik van die personenauto en niet ter grootte van het verschil in gemiddeld energiegebruik tussen de personenauto en de stadsbus. Bij de huidige gemiddelde bezettingsgraad van stadsbussen is er namelijk nog capaciteit over.

In hoofdstuk 5 worden de verschillen in energie- en emissiefactoren tussen personen- en goederenvervoerwijzen samengevat en wordt een beschouwing gegeven over de

toepasbaarheid van deze verschillen bij het kwantificeren van de effecten van verschuivingen tussen vervoerwijzen.

In dit rapport zullen voor het heden (1995) de gegevens van het CBS als basis dienen. Alleen indien er grote afwijkingen ten opzichte van het CBS in de literatuur worden gevonden, of indien CBS-gegevens onvoldoende gedesaggregeerd zijn, zal van de CBS-data worden afgeweken. Voor de toekomst worden de verschillende literatuurgegevens met elkaar vergeleken. Ten behoeve van de vergelijking tussen vervoerwijzen wordt gebruik gemaakt van de prognoses die ten behoeve van de MV4-knelpuntenanalyse zijn gedaan. In de energie- en emissiefactoren voor 2010 is alleen de uitvoering verondersteld van beleid gericht op emissies van nieuwe voertuigen, raffinaderijen en elektriciteitscentrales en op verbetering van de brandstofkwaliteit. Bovendien is alleen beleid verondersteld dat met grote waarschijnlijkheid tussen 1995 en 2005 uitgevoerd zal worden. Zie voor een gedetailleerde beschrijving van de MV4-knelpuntenanalyse het rapport 'Verkeer en Vervoer in de Nationale Milieuverkenning 4' (Geurs *et al.*, 1997, in voorbereiding)

2. DETERMINANTEN VOOR ENERGIEGEBRUIK EN EMISSIES

2.1. Inleiding

Dit hoofdstuk bevat een analyse van de volgende problemen:

- waardoor worden het energiegebruik en de emissies van vervoerwijzen bepaald, en
- welke aspecten spelen een rol bij het vergelijken van vervoerwijzen

Er zal in paragraaf 2.2 een beschrijving worden gegeven van de determinanten die het energiegebruik en de emissies van een vervoerwijze bepalen. Dit om duidelijk te maken wat de invloed van een eventuele verandering van de determinanten in de toekomst op de huidige (1995) energie- en emissiefactoren van de verschillende personen- en goederenvervoerwijzen is. Bovendien wordt het belang duidelijk gemaakt van het kennen van de reikwijdte van de in de literatuur aangetroffen energie- en emissiegegevens voor de verschillende vervoerwijzen. Dit om een realistische vergelijking tussen de vervoerwijzen te bewerkstelligen.

2.2. Determinanten

Energie- en emissiefactoren van verschillende vervoersmodaliteiten worden door een groot aantal determinanten beïnvloed. Deze determinanten kunnen worden opgesplitst in determinanten welke voornamelijk technisch van aard zijn en meestal betrekking hebben op het vervoermiddel, en in determinanten die verband houden met operationele aspecten. Grofweg kan gesteld worden dat de technische determinanten (zoals lucht- en rolweerstand) het energiegebruik per door het vervoermiddel afgelegde kilometer bepalen. Samen met dit energiegebruik bepalen de operationele determinanten het energiegebruik per reizigerkilometer (personenvervoer) of tonkilometer (goederenvervoer). Een voorbeeld van een operationele determinant is het gemiddeld aantal reizigers per vervoermiddel (personenvervoer) of het gemiddeld aantal vervoerde tonnen per vervoermiddel (goederenvervoer). De technische determinanten worden in paragraaf 2.2.1 behandeld. De operationele determinanten worden in paragraaf 2.2.2 besproken.

2.2.1. Technische determinanten

Het energiegebruik en de emissies van vervoermiddelen per afgelegde kilometer worden bepaald door verschillende determinanten welke voornamelijk technisch van aard zijn.

In deze paragraaf zullen de volgende technische determinanten aan bod komen:

- verbrandingsproces
- brandstofsoort
- uitlaatgas-nabehandeling
- veroudering
- aandrijftechniek
- luchtweerstand
- rolweerstand
- voertuiggewicht
- maximum snelheid en rijgedrag
- gebruikte meetmethode

Zij zullen achtereenvolgens worden besproken.

Verbrandingsproces

Niet alle motoren hebben hetzelfde rendement. Een Dieselmotor heeft in het algemeen een hoger rendement dan een Ottomotor (benzine, LPG) en daardoor een - ceteris paribus - lager energiegebruik. Oorzaak hiervoor is o.a. het type verbrandingsproces en het feit dat bij Ottomotoren gebruik wordt gemaakt van een smoorklep om de aangezogen lucht-brandstofhoeveelheid te regelen. Dit in tegenstelling tot Dieselmotoren waar de hoeveelheid ingespoten brandstof wordt geregeld. De invloed van motorbelasting op het rendement is bij Ottomotoren groter dan bij Dieselmotoren als gevolg van de smorende werking van de smoorklep (gasklep) en het rendement van Ottomotoren zal derhalve bij deellast meer inzakken dan dat van Dieselmotoren. Een methode om het motorrendement op te voeren en op die manier het brandstofverbruik te reduceren is de turbo-oplader. Deze zorgt ervoor dat de energieverliezen door het 'ademhalen' van de motor worden terug gebracht. In de praktijk worden turbo-opladers ookwel gebruikt om het vermogen op te voeren zonder dat dit tot een reductie van het brandstofverbruik leidt. In eerste instantie werd de turbo-oplader alleen bij dieselmotoren toegepast, op dit moment ook bij Ottomotoren.

Ook de emissies (direct na de motor) van deze twee verbrandingsprincipes verschillen van elkaar. Dieselmotoren emitteren over het algemeen per kilometer minder NO_x, VOS en CO, Ottomotoren minder SO₂ en deeltjes. Door toepassing van uitlaatgasnabehandelingstechnieken, die voor Otto- en Dieselmotoren verschillend zijn, gelden de genoemde algemeenheden anno 1995 zeker niet voor de emissies uit de uitlaat. Voor NO_x gold bijvoorbeeld in 1995 dat de parkemissiefactor van personen- of bestelauto's met drieweg-katalysator lager is dan die van een personen- of bestelauto met dieselmotor.

Een methode om de motoremissies te beperken die voornamelijk bij Ottomotoren in bestelauto's wordt toegepast is het recirculeren van het uitlaatgas (EGR). Een klein percentage van het uitlaatgas wordt teruggevoerd naar de inlaat en leidt tot een afname van de NO_x-emissie. EGR wordt ookwel toegepast bij Ottomotoren om het motorrendement bij deellast te verhogen en daarmee het brandstofverbruik te verlagen.

Het verschil in verbrandingsproces tussen Diesel en Ottomotoren heeft ook gevolgen voor de nabehandeling van uitlaatgas. Meer informatie hierover is in één van de volgende paragrafen te vinden.

Brandstofsoort

Energie- en emissiefactoren zijn verder afhankelijk van de gebruikte brandstofsoort. Het toepassen van andere brandstoffen dan benzine en dieselolie in een verbrandingsmotor leidt tot andere waarden voor de energie- en emissiefactoren. Gasvormige brandstoffen als LPG en aardgas leiden tot lagere motorrendementen dan vloeibare als dieselolie en benzine. Daartegenover staat dat LPG een hogere energie-inhoud per kilogram heeft dan benzine of dieselolie. Dit geldt niet voor aardgas. Brandstoffen als methanol, ethanol, raapzaadolie en waterstof hebben ieder hun eigen specifieke invloed op de emissiefactoren en het energiegebruik.

Vervoermiddelen voortbewogen door elektrische tractie zijn een verhaal apart. In principe geldt dat deze vervoermiddelen geen schadelijke stoffen ter plaatse emitteren. Productie van de elektriciteit in de elektriciteitscentrale leidt natuurlijk wel tot de emissie van schadelijke stoffen welke aan het vervoermiddel zal moeten worden toegerekend. Meer hierover is te vinden in paragraaf 2.3.

Uitlaatgas-nabehandeling

Voor zowel Ottomotoren en Dieselmotoren zijn inmiddels systemen voorhanden om de uitlaatgassen (deels) te reinigen. Voor Ottomotoren zijn dit de ongeregelde tweetraps en de geregelde ééntraps drieweg-katalysator die zowel CO, VOS en de organische fractie van deeltjes als NO_x kunnen reduceren. De ongeregelde katalysator wordt sinds 1993 in Nederland niet meer toegepast op nieuw verkochte personenauto's met een Ottomotor: door aanscherpingen van de emissie-eisen worden nog uitsluitend geregelde drieweg-katalysatoren toegepast.

Bij dieselmotoren zal altijd een zekere luchtvermaat aanwezig moeten zijn om het lucht-brandstofmengsel te kunnen verbranden. De drieweg-katalysator kan derhalve niet worden toegepast. Bij dieselmotoren in nieuwe personen- en bestelauto's wordt momenteel wel een oxidatiekatalysator (ééntraps-tweeweg-katalysator) toegepast om te kunnen voldoen aan de nu geldende emissie-eisen. Alleen VOS, CO en de organi-

sche fractie van deeltjes worden hiermee gereduceerd. Een nadeel van deze katalysator is de vorming van zwavelhoudende deeltjes uit SO₂ die de emissiefactor van deeltjes kan verhogen. Een verlaging van het zwavelgehalte van de brandstof vermindert dit fenomeen.

Het probleem van de NO_x-emissie door dieselmotoren wordt met de oxidatiekatalysator niet opgelost. Met Selectieve Katalytische Reductie (SCR), waarbij ureum aan het uitlaatgas wordt toegevoegd, kan de NO_x-emissie met 90% worden gereduceerd. Deze technologie wordt bij stationaire motoren in schepen reeds toegepast. Voor instationaire tractiemotoren in wegvoertuigen is deze technologie nog in de ontwikkelingsfase. De juiste dosering van het ureum bij snelle wisselingen van de motorbelasting geeft bij tractiemotoren problemen.

Een andere vorm van nabehandeling van uitlaatgas van dieselmotoren is filtering. Alleen de deeltjesemissie kan hiermee worden gereduceerd. Deze vorm van nabehandeling wordt als gevolg van problemen met de reiniging (regeneratie) van het filter momenteel (nog) niet commercieel toegepast.

Veroudering

De emissies van diverse componenten per kilometer door de diverse vervoermiddelen kunnen na verloop van tijd wijzigen. Door veroudering is het mogelijk dat een voertuig na verloop van tijd meer emitteert dan de typekeuringseis die gold toen het voertuig op de markt kwam. Slijtage van de motor en/of van de uitlaatgasnabehandelingstechniek spelen hierbij een belangrijke rol.

Hoewel dit op zich geen aspect van veroudering is, is verder van belang dat het standaard voertuig (motor) dat door de fabrikant of importeur wordt aangeboden om te worden getest, af kan wijken van de voertuigen zoals die in de praktijk worden gebruikt. Ten eerste kan het voor de test aangeboden voertuig beter zijn afgesteld dan de nieuw verkochte voertuigen. Verder kan de onderhoudstoestand in de praktijk niet optimaal zijn (o.a. slechte afstelling; vervuilde injectoren of bougies; te lage bandenspanning).

Aandrijftechniek

De invloed van aandrijftechniek op het energiegebruik komt in eerste instantie alleen tot uitdrukking in het rendement van de aandrijflijn. Dit is voor weg- en railvoertuigen gedefinieerd als de hoeveelheid energie die aan de wielen beschikbaar komt gedeeld door de hoeveelheid energie die door de motor wordt geleverd. Van belang is de vraag hoeveel energie er verloren gaat in het traject motor => wiel. Er zijn technieken om remenergie op te slaan en te hergebruiken en hiermee het rendement te verhogen.

Luchtweerstand

De luchtweerstand van een vervoermiddel is o.a. afhankelijk van de vorm van het voertuig. De vorm van het voertuig wordt vaak beschreven met twee parameters te weten het zogenaamd frontaal oppervlak en de luchtweerstandscoefficiënt. De snelheid heeft een kwadratische invloed op de luchtweerstand. De luchtweerstand is recht evenredig met het energiegebruik van een vervoermiddel. De verandering in de emissiefactoren is niet lineair met de luchtweerstand. Ook de verandering in de motorbelasting die het gevolg is van de snelheidsverandering speelt een rol.

Voor schepen is naast de luchtweerstand de stromingsweerstand van belang. Deze weerstand is afhankelijk van de stromingsweerstandscoefficiënt, de vaarsnelheid en het frontaal oppervlak van dat deel dat onder de waterlijn ligt. Deze laatste variabele is onder andere afhankelijk van de diepteligging van het schip.

Rolweerstand

De rolweerstand van vervoermiddelen over weg en rail is lineair afhankelijk van de massa van het vervoermiddel en de rolweerstandscoefficiënt van de band of het wiel. De laatste wordt niet-lineair beïnvloed door de snelheid. Een hogere snelheid leidt tot een hogere rolweerstand.

Voertuiggewicht

Het gewicht van het vervoermiddel is naast de lucht- en rolweerstand de derde energieconsument. Een hoger gewicht betekent dat er meer energie nodig is om het vervoermiddel te versnellen. Bij het afremmen gaat deze energie meestal volledig verloren en wordt omgezet in warmte.

In nieuwe (experimentele) voertuigconcepten voor het wegverkeer wordt terugwinning van remenergie veelvuldig toegepast, vooral elektrische concepten lenen zich gemakkelijk hiervoor. Bij treinen, trams en metro's is het in principe ook mogelijk remenergie terug toe voeren naar de bovenleiding. Op dit moment is het slechts bin-

nen één onderstation mogelijk energie tussen treinen uit te wisselen. Dit geldt bovendien alleen voor het nieuwste materieel. De overgang van 1.5 kV gelijkspanning naar 25 kV wisselspanning, die de komende jaren gaat worden doorgevoerd, maakt de weg naar energierugwinning bij het railvervoer gemakkelijker (NS Technisch onderzoek, 1996c).

Maximum snelheid en rijgedrag

Maximum snelheid en rijgedrag zijn weliswaar niet technisch maar hebben wel betrekking op het voertuig. Snelheid voert eigenlijk terug op de technische determinant luchtweerstand (kwadratisch verband). Een verlaging van de snelheid met 10% geeft een verlaging van de luchtweerstand van 21% en ceterus paribus eenzelfde verlaging van het specifieke energiegebruik. Een verlaging van de snelheid, van bijvoorbeeld 100 naar 90 km/h, leidt echter tot een lagere motorbelasting met een veelal lager motorrendement. Hierdoor neemt het brandstofverbruik over het algemeen minder af dan de genoemde 21%. Er zijn echter ook situaties denkbaar dat het tegenovergestelde geldt, bijvoorbeeld bij een daling van de snelheid vanaf zeer hoge snelheden. De invloed van een snelheidsverandering op de emissiefactoren is van vele factoren afhankelijk, o.a. van de verandering in motorbelasting.

Snelheidsbegrenzers kunnen leiden tot een afname van de maximum snelheden maar ook tot minder snelheidswisselingen. Een lagere snelheid doet - zoals aangegeven - het energiegebruik verlagen. Ook een vermindering van de snelheidswisselingen doet het energiegebruik verlagen: aangezien een snelheidsverandering extra energie kost die niet kan worden terug gewonnen zal het energiegebruik van een vervoermiddel door het toepassen van een snelheidsbegrenzer afnemen.

Rijgedrag (of vaargedrag) voert indirect terug op voertuiggewicht. Agressief rijgedrag, (o.a. snel accelereren en dientengevolge veelvuldig remmen) leidt tot veel energieverlies ten gevolge van het afremmen van de voertuigmassa en dus tot een hoger energiegebruik. Hoe lager het voertuiggewicht des te lager de invloed van het rijgedrag (Lenaers, 1995).

Agressief rijgedrag betekent bovendien dat de motor vaker in vollastcondities draait. Aangezien verbrandingsmotoren het maximum koppel leveren bij een klein luchttekort zal bij vollast meer brandstof worden toegevoerd dan theoretisch verbrand kan worden en zal de niet-verbrande of onvolledig verbrande brandstof als VOS, deeltjes of CO worden geëmitteerd. Het motorrendement is hierdoor natuurlijk ook lager waardoor het brandstofverbruik hoger is dan bij normaal rijgedrag.

Gebruikte meetmethode

Het energiegebruik en de emissies per voertuigkilometer van *individuele personenauto's* is afhankelijk van met welke testcyclus deze gegevens zijn verkregen. Uit een vergelijking tussen de Amerikaanse FTP-cyclus¹ en de Europese UDC + EUDC-

¹ Een testcyclus met een lengte van 17.9 kilometer bij een omgevingstemperatuur van 20 °C bestaande uit drie delen, het eerste deel (5.8 km) wordt met koude motor afgelegd. De gemiddelde snelheid is 34.2 km/h, de maximum snelheid is 91.2 km/h.

cyclus² blijkt dat het brandstofverbruik bij de zogenaamde Eurotest (UDC+EUDC) 6 tot 10% lager is dan bij de FTP-test. Ook de emissiefactoren van dezelfde voertuigen verschillen bij verschillende testcycli. De CBS-emissiegegevens hebben betrekking op resultaten die verkregen zijn met de Eurotest.

2.2.2. Operationele determinanten

In paragraaf 2.2.1 zijn de technische determinanten behandeld die het energiegebruik per door het vervoermiddel afgelegde kilometer bepalen. Wanneer het energiegebruik en de emissies per reizigerkilometer (personenvervoer) of tonkilometer (goederenvervoer) moeten worden bepaald om op die manier een vergelijking tussen vervoerwijzen mogelijk te maken dan komen de zogenoemde operationele determinanten om de hoek kijken. De operationele determinanten die in dit rapport worden beschouwd zijn:

- Bezettingsgraad / Beladingsgraad
- Beschikbare infrastructuur
- Aard van de vervoerde goederen
- Gemiddeld versus specifiek
- Gemiddeld versus marginaal

Bezettingsgraad / Beladingsgraad

De bezettingsgraad is gedefinieerd als het aantal reizigers gedeeld door het aantal plaatsen in een vervoermiddel. Het aantal reizigers per vervoermiddel is rechtstreeks van invloed op het energiegebruik en de emissies per reizigerkilometer. Hetzelfde geldt voor de beladingsgraad naar inhoud bij vervoermiddelen ten behoeve van goederenvervoer. De beladingsgraad naar inhoud is gedefinieerd als het gewicht van de vervoerde lading gedeeld door het wettelijk maximum toegelaten ladinggewicht. De beladingsgraad naar afstand heeft op zowel personen- als op goederenvervoer betrekking en is gelijk aan het aandeel beladen kilometers in het totaal aantal afgelegde kilometers. In het openbaar vervoer is van belang dat bussen en trams 's morgens en 's avonds leeg van en naar de remise rijden. Ook bij treinen is er sprake van deze zogenaamde materieelritten.

Beschikbare infrastructuur en routekeuze

Het netwerk voor de auto is fijnmaziger dan voor het openbaar vervoer. Om een bepaalde afstand te overbruggen per auto hoeft in het algemeen minder te worden om-

² Een testcyclus met een lengte van 11.0 km bij een omgevingstemperatuur van 20 °C bestaande uit drie delen, het eerste deel (4.1 km) is een stadscyclus met koude motor (eigenlijk lauw omdat pas na 40 seconden wordt gemeten). De gemiddelde snelheid bedraagt 32.5 km/h, de maximum snelheid is 120 km/h.

gereden dan wanneer diezelfde afstand per openbaar vervoer wordt afgelegd. Bij 'centrum-centrum verplaatsingen' daarentegen is de afstand per trein veelal korter dan per auto (mits er een directe spoorwegverbinding aanwezig is). Bij de bus speelt mee dat de (weg)infrastructuur weliswaar gelijk is aan die voor de auto, maar dat de gekozen route in verband met de ontsluiting van wijken en buurten tot extra kilometers leidt. Een andere factor is dat bij gebruik van trein en bus vaak voor- en natransport noodzakelijk is. Dit voor- en natransport betreft veelal korte afstanden en heeft, wanneer de auto wordt gebruikt, een nadelig effect op de totale emissies van de totale vervoersketen ('deur tot deur'). Het effect is nog groter wanneer in beschouwing wordt genomen dat het auto's betreft die voornamelijk met opwarmende motor rijden (verhoogde VOS- en CO-emissie).

Voor het goederenvervoer geldt voor wat betreft verschil in grofmazigheid van infrastructuur hetzelfde. Ook zal railvervoer en binnenvaart vaak gepaard gaan met voor- en natransport door vrachtauto's van en naar fabrieken, afnemers of consumenten. In een reële vergelijking tussen goederenvervoerswijzen moeten deze aspecten worden betrokken.

Aard van de vervoerde goederen

Deze determinant speelt eigenlijk alleen een rol bij goederenvervoer omdat treinen geen zwaardere of lichtere mensen vervoeren dan personenauto's of bussen. Er blijkt volgens een Amerikaanse studie (Komor, 1995) wel een verschil te bestaan tussen het soort goederen dat met wegvoertuigen wordt vervoerd en het soort dat met goederentreinen of binnenschepen wordt vervoerd. Wegvoertuigen blijken steeds meer volumineuze goederen te vervoeren zodat soms het volume van een vrachtauto eerder de bepalende factor zal zijn dan het maximaal te vervoeren tonnage. Bovendien zullen de hoogwaardige goederen voorzien zijn van isolatie of schokwerende verpakkingen, die het effect versterken. Wanneer een vrachtauto maximaal beladen is (naar volume) hoeft maar een beperkt deel van het laadvermogen (naar massa) te worden gebruikt. Bij railvervoer en binnenvaart waar over het algemeen bulkgoederen worden vervoerd is het probleem van de volumebegrenzing minder vaak aanwezig.

Deze determinant maakt het belang duidelijk dat wanneer vervoerswijzen ten behoeve van goederenvervoer met elkaar worden vergeleken dit moet worden gedaan onder de aanname dat dezelfde soort goederen worden vervoerd. In de literatuur worden vaak gemiddelde waarden genoemd die betrekking hebben op *in de praktijk* gerealiseerde gemiddelde energie- en emissiefactoren. De invloed van het feit dat de vervoerde goederen verschillend van aard zijn, is hierin dus verwerkt. De berekende waarden geven een groter verschil (in het nadeel van het wegvervoer) dan het geval zou zijn indien de waarden zouden worden berekend onder constanthouding van de aard van de vervoerde goederen.

Gemiddeld versus specifiek

Deze determinant kwam al aan bod bij de determinant 'aard van de vervoerde goederen'. Met deze determinant wordt bedoeld dat gemiddelde waarden voor energiegebruik en emissies van een vervoerwijze niet kunnen worden gebruikt voor een specifieke categorie binnen deze vervoerwijze. Zo zullen het energiegebruik en de beladingsgraad van een zware vrachtauto-aanhanger combinatie verschillen van die van de gemiddelde vrachtauto in Nederland. Deze determinant speelt ook een rol bij personenauto's als naar vervoersmotief wordt gekeken. Zo rijden zakelijke rijders over het algemeen in zwaardere auto's dan privé-rijders en rijden naar eigen zeggen agressiever (Pulles, 1994). Deze twee aspecten zorgen voor een hoger specifiek energiegebruik door zakelijke rijders in vergelijking tot privé-rijders.

Ook bij andere personenvervoerwijzen als bussen en treinen kan onderscheid worden gemaakt naar reismotief. Voor korte reizen in de stad zullen stadsbussen worden gebruikt die, omdat ze alleen in de stad rijden, een hoger energiegebruik per voertuigkilometer hebben dan de gemiddelde bus in Nederland. Hetzelfde geldt voor het verschil tussen stoptreinen en de gemiddelde trein omdat die vaker moeten stoppen en een lagere gemiddelde snelheid hebben.

Bij vergelijking tussen goederenvervoerwijzen kan wanneer het gaat over lange afstanden voor wegtransport niet de gemiddelde vrachtauto worden gehanteerd. Voor lange afstanden worden over het algemeen grotere vrachtauto- of trekkercombinaties gebruikt die een hogere beladingsgraad naar inhoud hebben dan de gemiddelde vrachtauto in Nederland. Bovendien wordt veelal met nieuwer/moderner materieel gereden bij constantere snelheden. Dit onderscheid beïnvloedt bijvoorbeeld de berekende energie- en emissieveranderingen ten gevolge van de aanleg van de Betuweroute (van Wee *et al.*, 1994).

Gemiddeld versus marginaal

Als de invloed van een maatregel, van belang voor energiegebruik en emissies, moet worden gekwantificeerd, zijn er twee methoden:

- uitgaan van gemiddelde factoren (op een nader te kiezen aggregatieniveau, bijvoorbeeld: alle goederenwegvervoer of het vervoer per grote vrachtauto)
- uitgaan van de *veranderingen* die optreden (marginale effecten).

Bij de methode 'gemiddelde waarden' wordt gebruik gemaakt van de (gemiddelde) waarden voor energiegebruik en/of emissies per ton- of reizigerkilometer. Een toename van het bijvoorbeeld aantal reizigerkilometers per trein leidt dan tot een procentueel gelijke toename van het energiegebruik en de emissies door treinen. Bij de marginale benadering wordt vastgesteld welke veranderingen er optreden. Indien de extra

treinreizigerkilometers uit het genoemde voorbeeld in de dalperiode worden gerealiseerd, is het extra energiegebruik relatief laag aangezien de meeste treinen nog ruimschoots voldoende capaciteit hebben in de dalperiode. Indien het extra spitsreizigers betreft, is het denkbaar dat het extra energiegebruik relatief hoog is, met name indien de treinen hierdoor moeten worden verlengd en er in de dienstregeling niet voldoende tijd is de extra treinstellen los te koppelen indien ze niet meer nodig zijn.

Een en ander is bijvoorbeeld van belang bij een verschuiving van de vervoerwijzekeuze van auto naar openbaar vervoer. De beide methoden zullen voor de berekening van de daling van energiegebruik en emissie door auto's nauwelijks verschillen. Voor de berekening van het extra energiegebruik en de extra emissies door het openbaar vervoer kan de keuze van de methode tot sterk verschillende resultaten leiden.

2.3. Reikwijdte van gegevens

Met de reikwijdte van gegevens wordt het antwoord op de vraag bedoeld: waarop hebben de in de literatuur aangetroffen gegevens met betrekking tot het energiegebruik en de emissies betrekking? Zo kunnen energie- en emissiefactoren zoals gevonden in de literatuur betrekking hebben op alleen nieuwe voertuigen maar ook op het totale voertuigenpark. Verder is het van belang te weten of de door olieraffinaderijen gebruikte energie bij het produceren van brandstof wel of niet in het energiegebruik van vervoersmiddelen is betrokken. Dezelfde en andere aspecten zijn ook van belang voor de emissies. De verschillende aspecten zullen afzonderlijk worden besproken. Bovendien zal voor ieder aspect de in dit rapport gemaakte keuze worden verduidelijkt.

Park- versus bouwjaarwaarden

Met dit aspect worden de verschillen bedoeld tussen gegevens over energie- en emissiefactoren van nieuwe vervoermiddelen (één bouwjaar) en die van het gehele park bestaande uit vervoermiddelen van verschillende ouderdom (alle bouwjaren). In dit rapport wordt gekozen voor parkgegevens omdat dit voor beleidsmakers de meest bruikbare gegevens zijn.

Basisjaar van scenario's

Het is van belang te weten op welk jaar gegevens betrekking hebben, en zo ook op welk basisjaar toekomstige verbeteringen betrekking hebben. Als basisjaar wordt in dit rapport 1995 gehanteerd. Wanneer gegevens voor andere jaartallen worden gebruikt, zal dit worden aangegeven. Voor ontwikkelingen in de toekomst zal zoveel mogelijk het jaar 2010 worden gebruikt onder andere omdat de meeste aangetroffen literatuur dit jaar als zichtjaar hanteert.

Territorium

Voor welk land gelden de waarden? Personenauto's in Italië hebben bijvoorbeeld een lager brandstofverbruik per gereden kilometer omdat ze gemiddeld lichter zijn. De bezettingsgraad is ook hoger dan in Nederland (Scholl *et al.*, 1996). Een ander aspect hierbij is de samenstelling van het nationale elektriciteitscentralepark en de import van elektriciteit. De samenstelling en het aandeel geïmporteerde elektriciteit zijn van belang omdat het gemiddelde rendement van de elektriciteitsproductie hiervan afhankelijk is, omdat het type centrale het energiegebruik en de emissie per kWh beïnvloedt en omdat de mate waarin emissiebeperkende maatregelen worden ingezet kan verschillen. In Frankrijk bijvoorbeeld wordt voornamelijk gebruik gemaakt van kernenergie zodat de emissiefactoren van elektrisch vervoer - ceteris paribus - in Frankrijk lager zullen zijn dan in Nederland. Nederland bleek in 1995 ca. 15% buitenlandse elektriciteit te hebben geïmporteerd waarvan de helft van Franse bodem kwam. Bij centrales met warmte-krachtkoppeling (WKK) is de wijze waarop CO₂-emissies worden toebedeeld aan enerzijds warmte en anderzijds kracht (electriciteit) van belang.

Wellicht ten overvloede vermeld; in dit rapport hebben de gegevens betrekking op de Nederlandse situatie in 1995.

Brandstof- en elektriciteitsproductie wel/niet inbegrepen in energiegebruik en emissies

De meeste gegevens over het energiegebruik van het vervoermiddel hebben betrekking op het energiegebruik in de vorm van verbruikte brandstof of van afgenomen elektriciteit aan de bovenleiding. Bij elektrische tractie is voor de Nederlandse situatie het energiegebruik om elektriciteit op te wekken en te distribueren ruim 2.5 maal zo hoog als de energie die voor het elektrische voertuig ter beschikking staat (Dings *et al.*, 1995e). Het energiegebruik ten behoeve van het produceren van fossiele brandstoffen bedraagt rond de 6-12% van de energie-inhoud van de geproduceerde brandstof (Rijkeboer *et al.*, 1992). Deze benadering van het energiegebruik van vervoersmiddelen wordt ketenbenadering of 'well to wheel'-benadering genoemd. Bij biobrandstoffen zoals raapzaadolie zal in een 'well to wheel'-benadering ook rekening moeten worden gehouden met de energie die gebruikt wordt om de biomassa te verbouwen, te oogsten en te verwerken tot brandstof. Dit geldt ook voor methanol en ethanol als zij geproduceerd worden uit hout of maïs.

Hetzelfde als voor het energiegebruik geldt voor de emissies. In de ketenbenadering kan bij het elektrische voertuig geen sprake zijn van een ZEV (Zero Emission Vehicle) maar zal dit een PEV (Pollution Elsewhere Vehicle) worden (citaat Rijkeboer, 1996). Uitzondering vormt de situatie dat elektrische energie duurzaam wordt opge-

wekt (zonne- of windenergie). Bij biobrandstoffen treedt in theorie geen CO₂-emissie op omdat de biomassa CO₂ gebruikt om te groeien. Als gevolg van het energiegebruik, en de daaraan gekoppelde CO₂-emissie, van het verbouwen en verwerken van de gewassen en de brandstofproductie zal er een zogenoemde restemissie van CO₂ overblijven (van Walwijk *et al.*, 1994).

Wanneer literatuurgegevens over het energiegebruik en de emissies van elektrische voertuigen worden gebruikt is het - zoals reeds is aangegeven - van belang te weten met wat voor elektriciteitscentrales de gebruikte energie wordt opgewekt. In landen als Frankrijk wordt bijvoorbeeld een veel groter percentage van de energie opgewekt met kerncentrales (80% tegen 5% in Nederland) die geen emissies (wel warmte en afval) veroorzaken maar wel een lager rendement hebben (33% tegen ca. 41% voor gasgestookte centrales).

In dit rapport is ervoor gekozen de 'well to wheel'-benadering van het energiegebruik en emissies van vervoerwijzen te gebruiken. Zowel het energiegebruik als de emissies door elektriciteitscentrales en raffinaderijen zijn verrekend in de energie- en emissiefactoren van vervoerwijzen. De benaming 'well' moet dus worden opgevat als ruwe olie bij de start van het raffinageproces in het geval van brandstofproductie (raffinaderij). In het geval van elektriciteitsproductie zal het de steenkool of het aardgas aan de poort van de elektriciteitscentrale betreffen. In de in dit rapport gekozen 'well to wheel'-benadering zijn winning en transport van brandstoffen naar raffinaderij of centrale dus niet in beschouwing genomen.

indirect energiegebruik en indirecte emissies

Met indirect energiegebruik en indirecte emissies worden het energiegebruik en de emissies als gevolg van het produceren, onderhouden en slopen van het vervoermiddel bedoeld. Ook het energiegebruik en de emissies als gevolg van aanleg en exploitatie van infrastructuur (weg- en waterbouw, straatverlichting, stations(verwarming), etc.) valt onder het indirecte energiegebruik en emissies. Deze zogenoemde life-cycle-benadering wordt in de gevonden literatuur over het vergelijken van energie- en emissiefactoren van de verschillende vervoerwijzen sporadisch gehanteerd. Bij gebrek aan literatuur over indirect energiegebruik en emissies als gevolg van aanleg van spoor- en vaarwegen en productie van treinen en schepen kan echter geen vergelijking tussen vervoerwijzen voor wat betreft indirect energiegebruik en emissies worden gemaakt. Er wordt in dit rapport dan ook geen verdere aandacht besteed aan indirect energiegebruik en indirecte emissies. Voor meer informatie wordt verwezen naar een lopend onderzoek aan de Rijksuniversiteit van Groningen (Moll *et al.*, 1996).

3. PERSONENVERVOER

3.1. Inleiding

In dit hoofdstuk wordt de aangetroffen literatuur over parkenergie- en parkemissiefactoren³ voor personenvervoerwijzen behandeld en zullen de voor dit moment meest realistisch waarden hiervoor worden afgeleid. De personenvervoerwijzen die in dit hoofdstuk worden behandeld zijn de personenauto, de autobus, de tram, de metro en de personentrein. Energiegebruik en emissies door deze personenvervoerwijzen worden in dit hoofdstuk uitgedrukt als energiegebruik en emissies per reizigerkilometer.

Allereerst zal per vervoerwijze het energiegebruik en de emissies per door het vervoermiddel afgelegde kilometer worden bepaald. Het energiegebruik zal worden uitgedrukt in het aantal megajoules per verreden kilometer (MJ/km) waardoor wordt gecorrigeerd voor verschillen in verbrandingswaarde tussen de verschillende brandstoffen. Bovendien kan met deze eenheid een vergelijking gemaakt worden tussen het energiegebruik door elektrisch aangedreven en dat door vervoermiddelen die door een verbrandingsmotor aangedreven worden. De gegevens uit de verschillende literatuurbronnen omtrent zowel energie- als emissiefactoren zullen veelal van elkaar verschillen. Voor zover mogelijk zullen de achterliggende oorzaken worden aangegeven.

Wanneer energiegebruik- en emissiefactoren per afgelegde kilometer door het vervoermiddel zijn vastgesteld, kan met behulp van aanvullende gegevens over bezetting (inzittenden) het energiegebruik en de emissies per reizigerkilometer worden berekend.

Een derde mogelijkheid is het uitdrukken van het energiegebruik en de emissies per zitplaatskilometer. Hiermee kan een vergelijking tussen het energiegebruik en de emissies van verschillende vervoerwijzen worden gemaakt wanneer de vervoerwijzen optimaal benut worden (bezettingsgraad = 100%). Energiegebruik en emissies per zitplaatskilometer zullen in dit rapport niet worden gegeven gezien het feit dat vervoerwijzen waarbij de gemiddelde bezetting 100% bedraagt niet realistisch zijn.

In de paragrafen 3.2 t/m 3.5 worden de parkenergie- en parkemissiefactoren van de verschillende personenvervoerwijzen achtereenvolgens behandeld. De nadruk zal liggen op het directe energiegebruik (zie paragraaf 2.4). Energie voor de produktie van brandstof of elektriciteit is hier dus in opgenomen. Dit geldt ook voor de emissiefactoren die aan het eind van iedere paragraaf worden behandeld. In paragraaf 3.6 zullen de beschouwde vervoerwijzen met elkaar worden vergeleken. Indien een vergelijking tussen de vervoerwijzen wordt gemaakt, dienen op de eerste plaats het directe ener-

³ Het zal dus gaan om energie- en emissiefactoren van het gehele park (of vloot wanneer het schepen betreft) opgebouwd uit vervoermiddelen van alle leeftijden.

giegebruik van de voertuigen en gegevens over de bezetting bekend te zijn. Daarnaast zijn enkele specifieke determinanten van belang. Denk bijvoorbeeld aan verschillen tussen stoptreinen en intercity's voor wat betreft het energiegebruik per afgelegde kilometer en de bezettingsgraad. Dit verschil is onder meer van belang als de energiewinst van een verschuiving van de auto naar de trein moet worden gekwantificeerd. Bij het openbaar vervoer speelt verder nog mee dat er kilometers worden afgelegd zonder dat er passagiers mee (kunnen) rijden, de zogenaamde materiaalritten. Dit extra energiegebruik zal in principe moeten worden toegerekend aan het energiegebruik per reizigerkilometer. Deze determinanten zijn al kort behandeld in paragraaf 2.2.2. Op de determinanten zal nader worden ingegaan in paragraaf 3.6 met als doel een 'rechtvaardige' vergelijking tussen personenvervoerwijzen te realiseren.

3.2. Personenauto's

per voertuigkilometer

Het energiegebruik per verreden kilometer (energie-inhoud van de verbruikte brandstof) van personenauto's op verschillende wegtypen is overgenomen van het CBS (CBS, 1995). Een gemiddelde personenauto gebruikt volgens het CBS gemiddeld 2.66 MJ/km, wordt alleen een stadsrit beschouwd dan komt het energiegebruik op 3.54 MJ/km. Het energiegebruik dat in de raffinaderij nodig is om brandstoffen te produceren, is volgens TNO in 1995 voor benzine ongeveer 12% van de energie-inhoud van de geproduceerde brandstof. Voor diesel was dit 6.7% en voor LPG 6.6 % (Rijkeboer *et al.*, 1992). Om het extra energiegebruik voor de produktie van brandstoffen voor personenauto's te berekenen zijn bovenstaande percentages gewogen naar energiegebruik per brandstofsoort door personenauto's in 1995 (69% benzine, 17% diesel, 14% LPG (CBS)). De waarde voor het extra energiegebruik als gevolg van raffinage van brandstoffen voor personenauto's bij de aangenomen brandstofmix bedraagt dan 11%. Duidelijk zal zijn dat bij een hoger percentage diesel- en LPG-gebruik door personenauto's dit extra energiegebruik lager wordt.

Een andere benadering om het extra energiegebruik als gevolg van het raffinageproces te bepalen is het gewogen gemiddelde (naar energie-aandeel) energiegebruik per MJ geproduceerde brandstof voor de produktie van alle in raffinaderijen geproduceerde brandstoffen (LPG, nafta, kerosine, benzine, diesel, LPG, etc.) en restprodukten (asfalt, zwavel, restgassen) te gebruiken. In 1995 was de efficiency van raffinaderijen 93.6% (schatting uit 1992) en wordt de toeslagfactor om het extra energiegebruik als gevolg van raffinage van brandstoffen te verrekenen 1.068 (Rijkeboer *et al.*, 1992).

Een keuze tussen beide bovenstaande benaderingswijzen is arbitrair. In het onderhavige rapport is gekozen voor eerste benadering. Bij de in deze paragraaf beschreven manier is de berekende waarde afhankelijk is van de brandstofmix in het wegverkeer.

De emissies per voertuigkilometer van personenauto's 'aan de pijp' (uit de uitlaat) zijn verkregen uit CBS (CBS-emmob, 1995). Deze emissiefactoren staan vermeld in tabel 3.1. De waarden voor de emissiefactoren van personenauto's, inclusief die als gevolg van raffinage van brandstof, zijn verkregen door de emissiefactoren van personenauto's volgens CBS (in g/km) op te tellen bij het produkt van de emissies als gevolg van raffinage van brandstof (in g/MJ brandstof) maal het energiegebruik (in MJ/km) van personenauto's (3.54 MJ/km voor stad; 2.66 MJ/km voor totaal). In tabel 3.1 zijn deze emissiefactoren uitgezet naast de emissiefactoren 'aan de pijp'. In tabel 3.2 zijn de emissiefactoren van raffinaderijen per kilogram geproduceerde brandstof vermeld voor benzine, diesel en LPG in 1995 en 2010 (Rijkeboer *et al.*, 1992)

Tabel 3.1. Emissiefactoren (g/km) personenauto's in 1995

	'aan de pijp'		inclusief raffinage	
	stad	totaal	stad	totaal
CO ₂	254	191	283	213
NO _x	0.92	1.25	0.95	1.27
CO	9.54	4.54	9.55	4.54
VOS	1.48	0.69	1.48	0.69
SO ₂	0.07	0.05	0.20	0.15
deeltjes	0.08	0.06	0.09	0.06

bron: CBS (emmob, 1995)

Tabel 3.2. Emissiefactoren in mg/MJ geproduceerde brandstof van raffinaderijen in Nederland (prognoses uit 1992)

		CO ₂	NO _x	CO	VOS	SO ₂	deeltjes
benzine	1995	9364	9.4	2.1	0.8	42.7	2.0
diesel	"	5340	5.3	1.2	0.5	24.3	1.1
LPG	"	5222	5.2	1.2	0.5	23.8	1.1
gemiddeld ^(a)	"	8100	8.1	1.8	0.7	36.9	1.7
benzine	2010	8977	3.0	2.0	0.8	17.8	0.5
diesel	"	5269	1.7	1.2	0.5	10.5	0.3
LPG	"	5288	1.7	1.2	0.5	10.5	0.3
gemiddeld ^(a)	"	7830	2.6	1.8	0.7	15.6	0.4

bron: TNO (Rijkeboer *et al.*, 1992)

^(a) gemiddelde waarden zijn verkregen door de emissiefactoren per brandstofsoort te wegen naar de energie-aandelen benzine, diesel en LPG in de brandstofconsumptie van personenauto's (in 1995 resp. 69, 17 en 14%)

Zoals in tabel 3.1 is te zien, worden de emissiefactoren van VOS en CO nauwelijks verhoogd door het toekennen van de emissies door de raffinage van brandstof aan de emissies van de personenauto. De NO_x- en de deeltjesemissiefactor worden verhoogd met respectievelijk 2% en 8%. De SO₂-emissiefactor wordt wel duidelijk verhoogd (ca. 200%). Reden hiervoor is dat de emissiefactoren 'aan de pijp' van SO₂ bij personenauto's relatief laag is ten opzichte van die van de raffinaderij (zwavelgehalte ruwe

olie is zeer veel hoger dan die van benzine). Aangezien de CO₂-emissie lineair gekoppeld is aan het energiegebruik, is de emissiefactor van CO₂ verhoogd met genoemde factor voor energie (1.11).

per reizigerkilometer

Bij personenauto's wordt voor wat betreft de bezetting vaak een onderscheid gemaakt naar privé en zakelijk verkeer en eventueel naar vakantieverkeer. In tegenstelling tot de meeste andere personenvervoerwijzen wordt bij personenauto's meestal de bezetting (in aantal inzittenden) in plaats van de bezettingsgraad (percentage van de capaciteit) gebruikt zodat discussies over de capaciteit (aantal zitplaatsen) worden vermeden. Het CBS geeft waarden voor de gemiddelde bezetting van Nederlandse voertuigen binnen Nederland in 1994 (= 1.65 inzittenden) en van Nederlandse voertuigen in het buitenland (= 2.5 inzittenden). In een studie door NEA is een extra onderscheid gemaakt tussen woonwerk verkeer, zakelijk verkeer en sociaal-recreatief verkeer. De eerste twee hebben een bezetting van ca. 1.15, sociaal-recreatief verkeer heeft een bezetting van 1.84. Volgens die studie is het energiegebruik per reizigerkilometer voor woonwerk verkeer 75% hoger dan voor sociaal-recreatief verkeer, namelijk 2.61 MJ/rkm (woon-werk) tegenover 1.49 MJ/rkm (sociaal-recreatief). Dit wordt vooral veroorzaakt door een lagere bezettingsgraad bij woon-werkverkeer maar ook door een hoger energiegebruik door het voertuig, waarschijnlijk door het feit dat woonwerk verkeer zwaardere voertuigen betreft die vaker last hebben van congestie (Tensen, 1996).

Vergeleken met de gemiddelde waarde van 1.68 MJ/rkm uit deze studie voor het energiegebruik per reizigerkilometer zijn andere bronnen redelijk overeenkomstig. BGC heeft voor 1992 de waarde 1.69 MJ/rkm berekend (BGC, 1994). Scholl *et al.* (1996) hebben voor 9 OECD-landen het energiegebruik per reizigerkilometer bepaald. In tabel 3.3 is een overzicht van enkele van deze landen gegeven.

Tabel 3.3. *Energiegebruik (excl. raffinage) van personenauto's in enkele Europese OECD-landen (1992)*

Land:	MJ/voertuigkm	bezettingsgraad	MJ/reizigerkm
Italië	2.40	1.83	1.31
Frankrijk	2.73	1.84	1.48
Denemarken	2.62	1.68	1.56
Noorwegen	2.93	1.85	1.58
Groot-Brittannië	3.19	1.74	1.83
Zweden	3.07	1.51	2.03
Duitsland	3.22	1.47	2.19
gemiddeld:	2.88	1.70	1.69

bron: International Energy Studies (Scholl *et al.*, 1996)

Te zien is dat Italië de laagste waarde heeft voor het energiegebruik per reizigerkilometer en per voertuigkilometer. Dit wordt veroorzaakt doordat het personenautopark in Italië een hoger aandeel lichtere auto's heeft dan dat in de overige genoemde landen. Zweden en Duitsland daarentegen hebben naast een relatief hoog energiegebruik per voertuigkilometer een lage bezettingsgraad, zodat het energiegebruik per reizigerkilometer hoog uitkomt.

Het energiegebruik en emissies per reizigerkilometer van personenauto's zoals in deze paragraaf besproken zijn samengevat in tabel 3.4. Het gaat hier om het directe energiegebruik en emissies, dus inclusief het raffinageproces. De waarden zijn verkregen door het directe energiegebruik en emissies per voertuigkilometer voor ieder reismotief afzonderlijk te delen door het gemiddeld aantal inzittenden. Tabel 3.4 kan **niet** gebruikt worden wanneer een vergelijking tussen personenvervoerwijzen moet worden gemaakt. Zoals eerder gezegd in paragraaf 2.2.2 spelen er dan specifieke determinanten als beschikbare infrastructuur een rol. Zie voor een vergelijking tussen personenvervoerwijzen paragraaf 3.6.

Tabel 3.4. Energie- en emissiefactoren personenauto's in 1995 (incl. raffinage)

	eenheid	woonwerk	stadsrit	soc.-recreatief	gemiddeld
Energie	MJ/km	2.96	3.93	2.96	2.96
bezetting	aantal inzit.	1.15	1.65 ^(a)	1.84	1.65
Energie	MJ/rkm	2.57	2.38	1.61	1.79
Emissie van:					
CO ₂	g/rkm	185	172	116	129
NO _x	"	1.11	0.58	0.69	0.77
CO	"	3.95	5.79	2.47	2.75
VOS	"	0.60	0.90	0.38	0.42
SO ₂	"	0.13	0.12	0.08	0.09
deeltjes	"	0.05	0.05	0.03	0.04

bron: CBS, TNO (Rijkeboer *et al.*, 1992)

^(a) voor de stadsrit is bij gebrek aan gegevens de bezetting gelijk aan die van de gemiddelde personenauto in Nederland in 1995

Toekomst

De ontwikkeling van het energiegebruik en de emissies van personenauto's in de toekomst (tot 2030) is van vele determinanten afhankelijk. Ten eerste zullen technische determinanten als lucht- en rolweerstandscoefficiënt veranderen. Ten tweede zullen de operationele determinanten als bijvoorbeeld de bezetting veranderen. De veranderingen van de determinanten kunnen het gevolg zijn van autonome ontwikkeling (niet door beleid beïnvloed) en van beleid.

De autonome ontwikkeling van determinanten die het energiegebruik bepalen (of de CO₂-emissie) wordt meestal gebaseerd op een historische analyse. In een CE-studie

ten behoeve van het DEOS-project (Duurzame Economische Ontwikkelings Scenario's) is de autonome ontwikkeling in de CO₂-emissie per voertuigkilometer (= energiegebruik) van benzine/diesel/LPG personenauto's vastgesteld op een reductie van respectievelijk 1.1/1.8/1.0% per jaar (gebaseerd op een historische analyse van de periode 1980-1991). Los van een verschuiving naar meer diesels geeft dit een gewogen verbetering van 1.24% per jaar (Wit et al., 1995). Aangezien er geen CO₂-beleid is gevoerd tussen 1980 en 1991 kan deze reductie voornamelijk autonoom worden genoemd. In de genoemde scenario's wordt deze autonome verbetering gehandhaafd ondanks het feit dat men op dit moment denkt over CO₂-emissie-eisen (of prijsbeleid) die de reductie waarschijnlijk zullen versterken. Bij de genoemde verbetering van 1.24% per jaar is echter geen rekening gehouden met een verschuiving in de aanschaf naar andere autotypen. Bij stijgende inkomens wordt een verschuiving naar zwaardere, minder zuinige autotypen verwacht, waardoor de efficiencyverbetering van het park achterblijft bij die van de afzonderlijke autotypen. Dit is waarschijnlijk het geval geweest tussen 1991 en 1995. De energie-efficiency van het personenautopark is in die periode niet of nauwelijks gestegen.

In de knelpuntenanalyse van de Nationale Milieuverkenning 4 (MV4) is hiermee wel rekening gehouden. De met behulp van het model FACTS (Pronk *et al.*, 1993) berekende efficiencyverbetering bedraagt voor de periode 1995-2010 ca. 15%, oftewel ongeveer 1% per jaar (Geurs *et al.*, 1997). Het gemiddelde energiegebruik van het personenautopark in 2010 wordt hiermee ca. 2.3 MJ/km (exclusief raffinage).

In FACTS wordt ook een prognose voor de emissiefactoren van het personenautopark in het jaar 2010 gegeven. De NO_x-emissiefactor zal bij de huidige beleidsvoornemens⁴ in 2010 met 80% zijn afgenomen t.o.v. 1995, de CO-emissiefactor met 80%, de VOS-emissiefactor met 70% en de deeltjesemissiefactor met 80%. De emissiefactoren van het personenautopark in 2010 worden 0.25 g/km voor NO_x, 0.94 g/km voor CO, 0.31 g/km voor VOS en 0.01 g/km voor deeltjes (Geurs *et al.*, in voorbereiding, 1997).

Voor wat betreft de NO_x-emissie worden in de CE-studie verschillende scenario's⁵ gepresenteerd. In het zogenaamde 'weak-scenario' is verondersteld dat door middel van aanscherping van de emissie-eisen de huidige "best-technical means"-emissiefactoren, i.e. 0.15 g/km voor benzinemotoren en 0.6 g/km voor dieselmotoren,

⁴ Aanscherping van de emissie-eisen voor nieuwe personenauto's in 2000. Voor benzine luidt het voorstel: CO: 2.3 g/km; VOS: 0.20 g/km en NO_x: 0.15 g/km; Voor diesel; CO: 0.64 g/km; VOS + NO_x: 0.56 g/km; NO_x: 0.50 g/km; deeltjes: 0.05 g/km.

⁵ Het 'weak scenario' veronderstelt alleen (inter)nationale normstelling en fiscale regelingen. Technieken die in 1995 al zonder extreme kostenverhogingen haalbaar zijn worden in 2030 algemeen toegepast.

In het 'strong scenario' daarentegen wordt onderzocht wat de invloed is op CO₂- en NO_x-emissies van een maximale verbetering van het bestaande concept, verlaging snelheden, verhoging van de bezettingsgraad, verschuiving naar O.V of van nieuwe concepten.

in 2030 als parkwaarde zullen gelden. Een jaarlijkse “autonome” NO_x-reductie van 5.1% wordt hiermee gerealiseerd.

Door middel van beleid zijn volgens het DEOS-scenario “strong” deze reducties te vergroten. Introductie van zeer zuinige auto’s (de “drie liter auto”) is een mogelijke optie evenals verlaging van de maximum snelheden en het aan banden leggen van het stijgende motorvermogen en gewicht van nieuwe auto’s. De NO_x-emissiefactor zal door introductie van de de-NO_x-katalysator bij nieuwe personenauto’s verder verlaagd kunnen worden. De laagste waarde die op dit moment bij nieuwe dieselauto’s bereikt is bedraagt 0.55 g/km. Voor nieuwe benzineauto’s is dit 0.1 g/km (Dings *et al.*, 1995a). Ter vergelijking: de parkwaarde voor dieselpersonenauto’s in 1995 bedroeg 0.71 g/km en voor benzinepersonenauto’s 1.48 g/km (CBS, 1995).

Het ECN heeft in een studie naar de weegfactoren voor luchtverontreiniging veroorzaakt door vervoer ook een schatting voor de afname van de emissiefactoren in 2010/2015 ten opzichte van 1990 gedaan. De CO₂-emissiefactor voor personenauto’s neemt met 1.2% per jaar af, de NO_x-emissiefactor daalt veel sterker met 11.2% per jaar tot 0.24 g/km wat waarschijnlijk zonder additioneel beleid niet kan worden gerealiseerd. De VOS-emissiefactor daalt met bijna 13% per jaar tot 0.03 g/km in het jaar 2010/2015 (Arends *et al.*, 1995).

De elektrische auto, nu nog meestal alleen kansvol gezien als stadsauto, heeft in potentie een lagere CO₂-emissiefactor dan een benzineauto. Vooral wanneer in de elektriciteitscentrales warmte-krachtkoppeling op grotere schaal toegepast gaat worden, zal dit verschil duidelijker worden. Een schatting voor het energiegebruik van elektrische voertuigen in 1994 ligt op 1.36 MJ/km bij gebruik van een loodzuurbatterij en op ca. 0.9 MJ/km in 2015 bij gebruik van een NaS-batterij (exclusief elektriciteitsopwekking),(van Binsbergen *et al.*, 1994). Bij een gemiddeld centralerendement van 42% zal het directe energiegebruik van elektrische voertuigen (loodzuur-batterij) in 1994 3.2 MJ/km bedragen. Ten opzichte van het directe energiegebruik van personenauto’s in 1994 van ca 2.9 MJ/km (CBS) is de elektrisch aangedreven personenauto nu nog in het nadeel. In 2015 bij een centralerendement van 48% (waarde voor 2010 (SEP, 1995)) zal het directe energiegebruik van elektrische personenauto’s (Natrium-Zwavel batterij) 1.9 MJ/km bedragen. De jaarlijkse verbetering van het energiegebruik van elektrisch voertuigen komt hiermee op 3.3% en dat doet het energiegebruik ver uitkomen onder de parkwaarde van het energiegebruik van personenauto’s in 2010 volgens FACTS van 2.3 MJ/km. Opgemerkt dient wel te worden dat de vraag of elektrisch vervoer in 2010 daadwerkelijk beter zal scoren, mede afhankelijk is van het al dan niet tot stand komen van Europese CO₂-wetgeving voor personenauto’s.

De auto met brandstofcel heeft in 1994 een energiegebruik van 1.56 MJ/km (alleen energie in de vorm van waterstof aan boord van het voertuig), op middellange termijn (2015) zal dit gereduceerd kunnen worden tot ca. 1.0 MJ/km. De wijze van productie

van waterstof is bepalend voor het uiteindelijke directe energiegebruik. Hybride aandrijving (diesel-elektrisch) kan leiden tot een energiegebruik van 1.27 MJ/km wanneer elektrisch wordt gereden en 3.08 MJ/km wanneer de verbrandingsmotor wordt gebruikt. Het wijze van gebruik van het voertuig (percentage kilometers in de stad, rijgedrag) bepaald het gemiddelde gebruik van het voertuig. (van Binsbergen *et al.*, 1994).

3.3. Bussen

per voertuigkilometer

Voor bussen geldt op dit moment dezelfde emissienormering als voor vrachtauto's en trekkers. Het energiegebruik van bussen is afhankelijk van het gebruiksdoel. Volgens NEA verbruiken bussen ten behoeve van het openbaar vervoer (stads- en streekbussen) 13.0 MJ/km. Bussen die gebruikt worden voor besloten busvervoer op lange afstanden verbruiken 9.9 MJ/km (Tensen, 1996). Attack 2.0 geeft voor stadsbussen (voertuiggewicht 14 ton) een brandstofverbruik van 0.41 kg/km (= 17.3 MJ/km)⁶. Dit verbruik is berekend op basis van experimentele formules van TNO (van de Venne *et al.*, 1996). Voor touringcars wordt in deze TNO-studie voorgesteld om de brandstofverbruiksrelaties van vrachtauto's (van 17.2 ton GVW) te gebruiken⁷. Hetzelfde geldt voor streekbussen buiten de bebouwde kom. De gemiddelde snelheid van streekbussen buiten de bebouwde kom wordt door TNO berekend op 28 km/h (afkomstig uit de FIGE-cyclus). Het brandstofverbruik van streekbussen buiten de bebouwde kom wordt hiermee 0.21 kg/km (9.1 MJ/km)⁸. Binnen de bebouwde kom hebben streekbussen hetzelfde brandstofverbruik als stadsbussen (17.3 MJ/km). Een overzicht is gegeven in tabel 3.5.a. De in de formules gebruikte gemiddelde snelheden per rittype zijn te zien in tabel 3.5.b.

⁶ Aannames hierbij zijn: stadsbus heeft 50 zitplaatsen, bezettingsgraad is 20%, reizigers wegen elk 80 kg en er zijn geen bussen die een zogenaamde ECO-programmering op de automatische transmissie hebben.

⁷ Aannames hierbij zijn: touringcar heeft 50 zitplaatsen, bezettingsgraad is 60%, reizigers + bagage wegen ieder 100 kg. Dit leidt tot een voertuiggewicht van 15.7 ton. De Cw-waarde is gelijk aan die van een enkele vrachtwagen (= 0.7) en de gemiddelde snelheid is gelijk aan die van vrachtwagens bij het desbetreffende rittype (19, 50 of 80 km/h).

⁸ Aannames hierbij zijn: bus heeft 50 zitplaatsen, bezettingsgraad is 20%, reizigers wegen ieder 80 kg. Dit leidt tot een GVW van 17.2 ton en een voertuiggewicht van 14.0 ton. De Cw-waarde is gelijk aan die van een enkele vrachtwagen (= 0.7) en de gemiddelde snelheid is 28 km/h.

Tabel 3.5.a *Energiegebruik van verschillende bustypen (excl. raffinage^(a))*

(MJ/km)	stad	landelijke weg	autosnelweg	totaal ^(b)
stadsbus	17.3	-	-	17.3
streekbus	17.3	9.1	-	13.2
touringcar	11.1	8.3	7.2	7.9

bron: TNO (van de Venne *et al.*, 1996)

^(a) Inclusief raffinage van dieselbrandstof worden de waarden een factor 1.067 hoger (Rijkeboer *et al.*, 1992)

^(b) Het gemiddelde energiegebruik van streekbussen is bepaald door te veronderstellen dat de kilometerverdeling over stad en landelijke wegen 50-50 is. Voor touringcars wordt de kilometerverdeling volgens CBS gehanteerd (= 10 : 30 : 60 voor stad : landelijk : autosnelwegen).

Tabel 3.5.b *Gemiddelde snelheden per wegtype*

(km/h)	stad	landelijke weg	autosnelweg
stadsbus	21.6	-	-
streekbus	21.6	28.0	-
touringcar	19.0	50.0	80.0

bron: TNO (van de Venne *et al.*, 1996)

In een studie van het Centrum voor Energiebesparing en Schone Technologie worden 8 autobusconcepten met elkaar vergeleken voor wat betreft energiegebruik en emissies. Voor stadsverkeer wordt voor de huidige diesel-aangedreven bus een energiegebruik van 12.9 MJ/km genoteerd. Voor landelijke wegen is dit 10.8 MJ/km. Andere concepten die worden behandeld zijn de aardgasbus, de LPG-bus, de trolleybus en enkele vormen van hybride aandrijving. De aardgas- en LPG-bus scoren voor zowel stedelijk als landelijk gebied slechter. Het energiegebruik in MJ/km van deze bussen is 25 à 30 % hoger dan dat van de huidige dieselbus. Daar staat wel tegenover dat de emissie van NO_x en deeltjes bijna 80% lager is, de CO-emissie 50% lager is en er geen SO₂-emissie optreedt. De VOS-emissie is echter ca. 2 maal zo hoog bij de aardgas- en de LPG-bus. In geval van aardgas zal de VOS-emissie voornamelijk uit methaan bestaan. Ondanks het lagere energiegebruik van de conventionele dieselbus is de CO₂-emissie van de aardgasbus 4-7% lager dan van de dieselbus. Die van de LPG-bus is 12-16% hoger dan die van de dieselbus (van den Haspel *et al.*, 1993).

De emissiefactoren in dit rapport van bussen 'aan de pijp' zijn verkregen door de emissiefactoren volgens CBS te bewerken. Voor stadsbussen zijn de emissiefactoren (in g/km) overgenomen en gecorrigeerd voor het verschil in brandstofverbruik tussen CBS (emmob-file- 1995) en TNO (van de Venne *et al.*, 1996). Voor streekbussen is hetzelfde gedaan met de ongewogen gemiddelde waarden voor de emissiefactoren in de stad en op landelijke wegen. Voor touringcars als laatste zijn de emissiefactoren volgens CBS gewogen naar kilometerprestatie in de stad, op landelijke wegen en op autosnelwegen en gecorrigeerd voor het verschil in brandstofverbruik. Hierna zijn de emissies als gevolg van de raffinage van dieselolie toegekend (zie voor de methodiek paragraaf 3.2) aan de emissies van bussen op de manier zoals bij personenauto's is beschreven. Aangezien het feit dat bussen voornamelijk dieselolie verbruiken zijn de

emissiefactoren van de raffinaderij bij de produktie van alleen dieselolie gebruikt. De emissiefactoren 'aan de pijp' en de directe emissiefactoren (inclusief raffinage) per verreden buskilometer zijn vermeld in tabel 3.6.

Tabel 3.6. *Emissiefactoren (g/km) van bussen in 1995*

	'aan de pijp'			inclusief raffinage		
	stadsbus	streekbus	touringcar	stadsbus	streekbus	touringcar
CO ₂	1268	968	579	1361	1038	621
NO _x	19.8	17.0	11.5	19.9	17.1	11.5
CO	8.8	5.1	2.2	8.8	5.1	2.2
VOS	6.9	4.0	1.7	6.9	4.0	1.7
SO ₂	1.2	0.9	0.6	1.7	1.3	0.8
deeltjes	2.1	1.5	0.8	2.1	1.5	0.8

bron: CBS (emmob-file, 1995), TNO (van de Venne *et al.*, 1996)

In tabel 3.6 is te zien dat alleen de CO₂- en de SO₂-emissiefactor significant wordt verhoogd (7.6% voor CO₂; 33% voor SO₂) als de emissies door raffinage van dieselolie worden toegerekend aan de emissie van de dieselbus. De andere emissies worden met minder dan 0.5% verhoogd.

Het energiegebruik van een trolleybus, zoals alleen in Arnhem wordt gebruikt, wijkt voor stedelijk verkeer niet of nauwelijks af van dat van de dieselbus, op landelijke wegen neemt het direct energiegebruik (d.w.z. de energie die in de vorm van brandstof aan de elektriciteitscentrale moet worden aangeboden om de bus één kilometer te laten rijden) van de trolleybus toe in vergelijking tot stedelijke wegen en is het energiegebruik 16% hoger dan dat van de dieselbus (van den Haspel *et al.*, 1993). De emissies van dit busconcept zijn afhankelijk van de emissies per aan de elektriciteitscentrale in de vorm van brandstof aangeboden eenheid energie. De SEP (Samenwerkende ElektriciteitsProduktiebedrijven) levert deze gegevens. In tabel 3.7 staan zowel de emissiefactoren voor 1996 als voor 2010 vermeld, evenals het rendement van de centrales.

Tabel 3.7. *Emissies van Nederlands elektriciteitscentralepark*

	rendement (%)	emissies in gram per GJ brandstof					deeltjes
		CO ₂ (kg)	NO _x	SO ₂	VOS	CO	
1996	41.5	71.5	82	33	1.5	8.2	0.1
2010	47.6	75.1	63	16	1.4	7.5	0.1

bron: SEP (1995)

Opvallend is de hogere emissie van CO₂ per eenheid van energie die aan de centrale wordt toegevoerd in 2010 ten opzichte van 1996. Oorzaak hiervan ligt o.a. in het omstreeks 2007 sluiten van Nederlands laatste (emissievrije) kerncentrale. Hiervoor in de plaats komt waarschijnlijk een gasgestookte centrale. Bovendien gaat de SEP uit van het wegvallen van de belangrijkste importen van elektriciteit. In 1995 werd ca. 7-8% van de in Nederland gebruikte elektriciteit geïmporteerd uit Frankrijk waar kerncentrales ca. 80% van de elektriciteit leveren.

per reizigerkilometer

Wanneer naar het energiegebruik per reizigerkilometer van busvervoer wordt gekeken moet een onderscheid worden gemaakt naar besloten busvervoer en openbaar busvervoer. De laatste kan weer worden ingedeeld naar streek- en stadsbusvervoer.

In de onderhavige studie zullen de gegevens voor het energiegebruik van bussen uit de vorige paragraaf worden gecombineerd met gegevens over bezettingsgraden die verstrekt zijn door de verschillende openbaar-vervoerorganisaties. Deze zijn in tabel 3.8 en 3.9 weergegeven. Het gaat hier om de bezettingsgraad, die is gedefinieerd als het totaal aantal reizigerkilometers gedeeld door het aantal plaatskilometers. Voor touringcarvervoer is de waarde in tabel 3.10 overgenomen van NEA (Tensen, 1995). In deze NEA-studie is het touringcarvervoer opgesplitst naar geregeld vervoer, dagtochten binnenland en meerdaagse reizen en pendelritten. Voor onderhavige studie wordt het ongewogen gemiddelde van deze drie touringcar-categorieën gebruikt.

Tabel 3.8. Bezetting van stadsbusvervoer

bron:	jaartal	reiziger- kms (mln)	bezettings- graad (%)	plaats- kms (mln) ^(a)	plaatsen per bus (-)	bus- kms (mln)	passagiers per bus (-)
GVB (A'dam)	1994	239	23.0	1041	70	14.9	16.1
RET (R'dam)	1995	138	16.5	836	"	11.9	11.6
GVU (Utrecht)	1995	102	19.2	531	73	7.3	14.0
HTM (Den Haag)	1995	135	27.3	495	"	6.8	20.0
VSN (stad)	1994	685				58.0	11.8
totaal		1298				98.9	13.1

^(a) Het aantal plaatskilometers is gedefinieerd als het aantal zitplaatskilometers plus een van het busoppervlak afhankelijk aantal staanplaatskilometers. Het aantal staanplaatsen in een bus is vastgesteld op 4 maal het aantal m² staruimte (Ministerie van Verkeer en Waterstaat) zodat het aantal plaatsen voor 12 meter-stadsbussen 60 en voor gelede bussen 90 bedraagt, de samenstelling van het voertuigpark bepaalt het gemiddeld aantal plaatsen per bus.

Tabel 3.9. Bezetting van streekbusvervoer

bron	jaartal	reizigerkms (mln)	buskms (mln)	passagiers per bus
VSN (streek)	1994	3409	248	13.7

Tabel 3.10. Bezetting van binnenlands touringcarvervoer

bron	jaartal	reiziger- kms (mln)	bezettings- graad (%)	plaats- kms (mln)	plaatsen per bus (-)	bus- kms (mln)	passagiers per bus (-)
NEA ^(a)	1994	4000 ^(b)	63.3	6319	50	126	31.7

^(a) (Tensen, 1995)

^(b) bron CBS-statistiek van het personenvervoer, 1994.

Gebruik makend van bovenstaande gegevens over het aantal passagiers per bus samen met het energiegebruik per voertuigkilometer uit tabel 3.4 is het energiegebruik per reizigerkilometer ('well to wheel') van de verschillende busvervoerswijzen te bepalen. Het resultaat is afgebeeld in tabel 3.11. De waarden uit tabel 3.11 representeren het directe energiegebruik van en de emissies door bussen op het moment dat er passagiers worden vervoerd.

Tabel 3.11. Energiegebruik en emissies per reizigerkilometer van verschillende bustypen in 1995 (incl. raffinage)

	eenheid	stadsbus	streekbus	touringcar
Energie	MJ/km	18.5	14.1	8.4
bezetting	aantal inzit.	13.1	13.7	31.7
Energie	MJ/rkm	1.41	1.03	0.27
CO ₂	g/rkm	104	76	20
NO _x	"	1.52	1.25	0.36
CO	"	0.67	0.38	0.07
VOS	"	0.53	0.29	0.05
SO ₂	"	0.13	0.09	0.02
deeltjes	"	0.16	0.11	0.03

bron: TNO, NEA, CBS

In de eerder genoemde studie door het NEA (Tensen, 1996) wordt ook voor busvervoer het energiegebruik per reizigerkilometer afgeleid. Uit deze studie blijkt dat bij busvervoer in tegenstelling tot personenautovervoer meer determinanten een rol spelen in het energiegebruik en de emissies per reizigerkilometer dan alleen het energiegebruik per voertuigkilometer en de bezetting. Zo is ook bijvoorbeeld de verhouding tussen het aantal kilometers dat daadwerkelijk wordt afgelegd ten behoeve van personenvervoer (bijvoorbeeld de lijndienstkilometers) en het *totaal* aantal afgelegde kilometers (dus inclusief af- en aanrijden, de zogenoemde materiaalritten, en het omrijden als gevolg van ontsluiting van woonwijken) van belang. Bij besloten busvervoer is naast het heen- en terugrijden van de standplaats naar de opstapplaats ook het leeg terugrijden vanaf de bestemming bepalend voor het energiegebruik per reizigerkilometer.

Wanneer een vergelijking tussen personenvervoerswijzen wordt gemaakt moeten deze extra determinanten betrokken worden in het energiegebruik en de emissies per reizigerkilometer. In de NEA-studie zijn waarden voor deze determinanten opgenomen en het blijkt dat die het energiegebruik per reizigerkilometer substantieel verhogen. Zo is bijvoorbeeld gegeven dat ca. 7% van de door stads- en streekbussen afgelegde kilometers materiaalritten betreft. Touringcars moeten doorgaans leeg terug rijden vanaf de eindbestemming of leeg naar de opstapplaats. De schatting in de NEA-studie hiervoor

is dat dit ca. 24% bedraagt van alle gereden kilometers door touringcars⁹. Het omrijden (ten opzichte van dezelfde verplaatsing per personenauto) ter ontsluiting van woonwijken (stads- en streekbussen) of voor het langsrijden van verschillende opstapplaatsen (touringcars) wordt in de NEA-studie geschat op 25% voor stads- en streekbussen en 6% voor touringcars. Deze determinanten, die het energiegebruik per reizigerkilometer beïnvloeden, worden in paragraaf 3.6 voor alle personenvervoerwijzen gegeven en gebruikt om een reële vergelijking tussen personenvervoerwijzen mogelijk te maken (Tensen, 1995).

Toekomst

Voor de toekomstige ontwikkelingen in het energiegebruik en de emissies van bussen wordt verondersteld dat deze parallel lopen aan de ontwikkelingen bij vrachtauto's (van Wee *et al.*, 1993), (van de Venne *et al.*, 1996). Dit betekent dat de toekomstige wetgeving voor de emissies door vrachtwagens en trekkers ook op bussen van toepassing zal zijn. In tabel 4.12 in paragraaf 4.3 is deze toekomstige emissiewetgeving afgebeeld. Evenals bij vrachtwagens en trekkers zal er mede door vooral de NO_x-emissiewetgeving in de toekomst geen afname van het energiegebruik per voertuigkilometer mogen worden verwacht. Afname van het energiegebruik per reizigerkilometer zal slechts plaatsvinden als het aantal passagiers zal toenemen. In een NEI-studie "de milieufunctie van het openbaar vervoer in stedelijke gebieden" zijn enkele scenario's gegeven voor de bezettingsgraad van bussen. De prognose voor de bezettingsgraad loopt uiteen van een 4% afname, met als belangrijkste oorzaak het wegvallen van de OV-studentenkaart, tot een 29% toename (conform de prognoses door V&W t.b.v. SVV-II, deel d) (van den Bossche *et al.*, 1996).

3.4. Trams/Metro's

Voor trams en metro's is relatief weinig informatie gevonden. Volgens NEA is het energiegebruik aan de bovenleiding per gereden kilometer van een tram 9.4 MJ en van een metro 16.2 MJ. De gemiddelde bezettingsgraad van trams in Rotterdam, Amsterdam en Den Haag bedroeg in 1994 gewogen naar reizigerkilometers 27% (informatie van RET, GVB en HTM). Het aantal plaatsen in een gemiddelde tram bedraagt 120, inclusief staanplaatsen (Tensen, 1996). De gemiddelde bezettingsgraad van metrovervoer in Amsterdam was in 1994 gelijk aan 29% (informatie GVB). Het aantal zit- en staanplaatsen in een metro bedraagt ca. 180 (Tensen, 1996).

Het directe energiegebruik (in de vorm van aan de centrale toegevoerde energie) per

⁹ Per besloten-busvervoercategorie is het percentage kilometers zonder passagiers (aan de hand van de beladingsgraad naar afstand) opgeteld bij het percentage kilometers ten behoeve van af- en aanrijden. Daarna is het ongewogen gemiddelde van deze waarden voor de drie in de NEA-studie genoemde besloten-busvervoercategorieën bepaald.

reizigerkilometer wordt bepaald aan de hand van de verhouding tussen energiegebruik van de elektriciteitscentrale en energiegebruik aan de bovenleiding. Deze verhouding wordt bepaald door en het rendement van de centrale (42% (SEP, 1995)) en de verliezen door elektriciteitsdistributie (10% (Dings *et al.*, 1995e)). De verhouding wordt hiermee 2.6. In tabel 3.12 is de afleiding van het directe energiegebruik per reizigerkilometer weergegeven.

Tabel 3.12. Energiegebruik per reizigerkilometer van trams en metro's in 1994 (inclusief elektriciteitsproductie)

	trams		metro's	
Energiegebruik (MJ/km)	24.9		42.9	
	bezettings graad (%)	plaatskms (mln)	bezettings graad (%)	plaatskms (mln)
Rotterdam (RET)	22.0%	629	28.8% ^(a)	1431
Amsterdam (GVB)	28.6%	1198	28.8%	912
Den Haag (HTM)	22.6%	1086	n.v.t.	n.v.t.
Gewogen Gemiddeld	24.9%		28.8%	
Aantal plaatsen (-)	120		180	
Energiegebruik (MJ/rkm)	0.83		0.83	

^(a) de bezettingsgraad van metro's in Rotterdam was niet uit de openbare gegevens van de RET te bepalen en de bezettingsgraad is derhalve gelijk aan die in Amsterdam verondersteld.

Voor de emissiefactoren van trams en metro's worden de emissiefactoren zoals gegeven door het SEP (1995) gebruikt. Zie hiervoor paragraaf 3.3 tabel 3.7. De waarden voor de directe emissiefactoren per reizigerkilometer staan vermeld in tabel 3.13.

Tabel 3.13. Emissiefactoren door trams en metro's in 1995 ('well to wheel')

	eenheid	trams	metro's
CO ₂	g/rkm	59.3	59.0
NO _x	"	0.0681	0.0677
CO	"	0.0068	0.0068
VOS	"	0.0012	0.0012
SO ₂	"	0.0274	0.0272
deeltjes	"	0.0001	0.0001

N.B. door de nagenoeg identieke waarden voor het energiegebruik per reizigerkilometer van trams en metro's (tabel 3.12) zijn ook de emissiefactoren ongeveer gelijk.

De gegevens uit de tabellen 3.12 en 3.13 zijn niet bruikbaar om personenvervoeren met elkaar te vergelijken. Net als bij busvervoer moet bij tram- en metrovervoer ook rekening worden gehouden met af- en aanrijden (remise <=> station) en omrijden als gevolg van beperkte infrastructuur of ontsluiting van woonwijken. In de eerder genoemde NEA-studie is voor trams gegeven dat het percentage kilometers ten behoeve van af- en aanrijden 4.5% van alle gereden kilometers bedraagt. Voor metro's is dit 3%. Het omrijden van zowel trams als metro's leidt tot 10% meer kilometers vergeleken met dezelfde verplaatsing per personenauto (Tensen, 1996). In paragraaf 3.6 waar

een vergelijking tussen verschillende personenvervoerwijzen wordt gemaakt zullen deze determinanten worden gebruikt ter correctie van de waarden voor het energiegebruik en de emissies per reizigerkilometer zoals in tabel 3.12 en 3.13 weergegeven.

Toekomst

In de eerder genoemde NEI-studie “de milieufunctie van het openbaar vervoer in stedelijke gebieden” wordt voor de toekomstige ontwikkelingen van trams en metro’s gegeven dat nieuwe trams en metro’s al 5% (draaistroom motoren) tot 25% (gelijkstroom) minder energie gebruiken dan de gemiddelde waarde voor het park in 1995. Penetratie van deze nieuwe vervoermiddelen verloopt traag gezien de levensduur van 30 jaar. In 2010 is globaal de helft van het park vervangen en zal de reductie maximaal 12.5% bedragen in geval er alleen trams en metro’s met gelijkstroommotoren wordt aangeschaft. Voor wat betreft de ontwikkeling van het aantal passagiers per tram of metro tot 2010 loopt de prognose uiteen van 4% afname (afschaffing OV-studentenkaart) tot 47% toename (prognose door V&W t.b.v. SVV-II) (van den Bosche *et al.*, 1996).

De toekomstige ontwikkeling van de emissies door trams en metro’s wordt samen met het energiegebruik van trams en metro’s mede bepaald door de emissies bij de elektriciteitscentrales per geproduceerde eenheid elektriciteit. Zie hiervoor paragraaf 3.3, tabel 3.7 en paragraaf 3.5.

3.5. Personentreinen

per treinkilometer

In een studie van CE (Dings *et al.*, 1995e) is onderzocht wat de verschillen zijn in energiegebruik en emissies tussen elektrische aangedreven locomotieven (E-tractie) en dieselelektrisch aangedreven locomotieven (DE-tractie). De resultaten zijn alle in het nadeel van DE-tractie. In tabel 3.14 staan de emissiefactoren in g/GJ aan de wielband geleverde energie vermeld. Er is een onderscheid gemaakt bij E-tractie tussen 1.5 kV_{DC} en 25 kV_{AC} omdat er plannen zijn de bovenleidingen Nederland in 2010 omgeschakeld te hebben naar 25 kV_{AC} gezien de lagere distributieverliezen bij wisselspanning (3.5% bij 25 kV_{AC} tegen 10.3% bij 1.5 kV_{DC} (Dings *et al.*, 1995e)).

Tabel 3.14. Emissiefactoren en ketenrendement van elektrische en dieselelektrische tractie in 1996 (prognose uit 1995)

(g/GJ aan de wielband)	DE-tractie	E-tractie	
		1.5 kV _{DC}	25 kV _{AC}
rendement (-)	0.283	0.313	0.337
CO ₂ (kg/GJ)	260	229	212
NO _x	4716	261	242
SO ₂	146	107	99
VOS	261	5	5
CO	400	26	24
deeltjes	107	0.33	0.31

bron: CE (Dings *et al.*, 1995e)

Berekening van de emissies per gereden treinkilometer vindt nu plaats door bovenstaande getallen te vermenigvuldigen met het energiegebruik (MJ/km). Voor 1993 wordt het energiegebruik voor personen- en goederenvervoer afzonderlijk berekend op de volgende wijze¹⁰:

- Het elektrisch energiegebruik in 1993 is 4536 mln MJ (aan de bovenleiding) en het aantal verbruikte liters dieselolie bedraagt 33.6 mln (= 1205 mln MJ) (NS, 1994).
- Voor 1 MJ elektrische energie aan de bovenleiding moet aan de centrale 2.64 MJ in de vorm van brandstoffen worden toegevoerd (rendement centrale is 42%, 10% verliezen door distributie) (Dings *et al.*, 1995e).
- Voor 1 MJ energie in dieselbrandstof moet aan de raffinaderij 1.067 MJ in de vorm van ruwe olie worden toegevoerd (Rijkeboer *et al.*, 1992).
- Het aantal nuttige (met passagiers of goederen) treinkilometers t.b.v. personenvervoer bedroeg in 1993 110.8 mln. Hiervan wordt 47% afgelegd door intercity's en sneltreinen (alleen elektrisch aangedreven), 47% door elektrisch aangedreven stoptreinen en 6% door diesel-elektrisch aangedreven stoptreinen (NS, 1996c). Ten behoeve van goederenvervoer worden 7.6 mln (binnenlands en internationaal vervoer op Nederlands grondgebied) treinkilometers afgelegd.
- Van de elektrische energie wordt 90% gebruikt voor personenvervoer en 10% voor goederenvervoer, van de dieselbrandstof wordt 60% gebruikt voor personenvervoer en 40% voor goederenvervoer (NS, 1996a).
- Het totale energiegebruik t.b.v. personenvervoer wordt hiermee:

elektrisch:	$0.9 * 2.64 * 4536$	$= 10.78 \text{ PJ}$
diesel-elektrisch:	$0.6 * 1.067 * 1205$	$= \underline{0.77 \text{ PJ}}$
		$= 11.55 \text{ PJ}$

en t.b.v. goederenvervoer:

elektrisch:	$0.1 * 2.64 * 4536$	$= 1.20 \text{ PJ}$
diesel-elektrisch:	$0.4 * 1.067 * 1205$	$= \underline{0.51 \text{ PJ}}$
		$= 1.71 \text{ PJ}$

¹⁰ In de jaarverslagen vanaf 1994 worden geen gegevens meer gepubliceerd over het elektrisch energiegebruik en het brandstofverbruik.

- Het energiegebruik per treinkilometer wordt op deze manier:

personenvervoer:	elektrisch	104 MJ/treinkm
	diesel-elektrisch	116 MJ/treinkm
goederenvervoer:	beide	225 MJ/treinkm
- Aan de hand van een studie van het NEI (van den Bossche, 1996) is het energiegebruik van elektrische personentreinen nog uit te splitsen naar intercity's (inclusief sneltreinen) en stoptreinen. Het energiegebruik wordt dan:

personenvervoer:	elektrisch intercity	97 MJ/treinkm
	elektrisch stoptrein	111 MJ/treinkm

Een kanttekening bij deze waarden is dat bij het energiegebruik per treinkilometer bij goederenvervoer ook het verbruik van dieselolie ten behoeve van rangeren is meegenomen. Het is arbitrair of dit energiegebruik volledig moet worden toegerekend aan treinkilometers gemaakt ten behoeve van goederenvervoer of dat er ook dieselolie wordt verbruikt ten behoeve van het rangeren van personentreinen. In deze studie is het dieselolieverbruik ten behoeve van rangeren van personen- en goederentreinen impliciet gerelateerd aan het totale dieselolieverbruik door diesel-elektrische personentreinen respectievelijk goederentreinen.

De emissies door elektrische personentreinen zijn met behulp van tabel 3.7 uit paragraaf 3.3 en het energiegebruik van elektrische treinen, zoals hierboven afgeleid, te berekenen. De emissies van diesel-elektrische personentreinen zijn met de gegevens uit tabel 3.14, tabel 3.2 (voor dieselolie) en bovenstaand energiegebruik te berekenen. In tabel 3.15 zijn zowel de emissiefactoren van diesel-elektrische en elektrisch stoptreinen alsook die van intercity's weergegeven.

Tabel 3.15. Emissiefactoren (g/treinkm) van personentreinen in 1995^(b)

	eenheid	stoptreinen			intercity's	totaal
		E	DE	totaal	E	
verdeling treinkms ^(a)	%	47	6	53	47	100
energiegebruik	MJ/treinkm	111	116	112	97	105
CO ₂	g/treinkm	7937	9155	8070	6936	7537
NO _x	"	9.10	155.44	25.20	7.95	17.09
CO	"	0.91	13.27	2.27	0.80	1.58
VOS	"	0.17	8.62	1.10	0.15	0.65
SO ₂	"	3.66	7.61	4.10	3.20	3.68
deeltjes	"	0.01	3.65	0.41	0.01	0.22

^(a) mededeling C. Kouwenhoven (NS-Reizigers)

^(b) de aanname is gedaan dat het energie-efficiency van treinen zoals afgeleid niet verandert tussen 1993 en 1995

per reizigerkilometer

Het energiegebruik per reizigerkilometer van treinen is berekend aan de hand van bezettingsgraden van stoptreinen en intercity's, zoals opgegeven door NS-reizigers, die te vinden zijn in tabel 3.16. De bezettingsgraden zijn gebaseerd op de benutting van het aantal zitplaatsen, staanplaatsen worden in tegenstelling tot bij het openbaar busvervoer, niet meegerekend. Sneltreinen worden gerekend bij intercity's. De waarden zijn niet meer dan indicaties.

Tabel 3.16. *Bezettingsgraden^(a) (%) Nederlandse Spoorwegen in 1995*

%	spits ^(b)	dal	totaal
stoptreinen	50.0	25.7	33.1
intercity's ^(c)	53.2	41.6	44.3
totaal	51.6	36.1	38.0

bron: NS (1996b)

^(a) gebaseerd op aantal zitplaatsen

^(b) spits is 7.00-9.00 uur en 16.00-18.00 uur

^(c) bij intercity's zijn sneltreinen inbegrepen

Samen met het energiegebruik per treinkilometer, zoals afgeleid in eerder in deze paragraaf, is met deze bezettingsgraden en het gegeven dat in 1995 een personentrein (gemiddelde van stop-, sneltreinen en intercity's) gemiddeld 349 zitplaatsen telde, het directe energiegebruik per reizigerkilometer te bepalen. In tabel 3.17 is dit specifieke energiegebruik weergegeven.

Tabel 3.17. *Energiegebruik (MJ/rkm) Nederlandse Spoorwegen in 1995 (inclusief elektriciteitsproductie)*

MJ/rkm	spits ^(a)	dal	totaal
stoptreinen	0.64	1.25	0.97
intercity's ^(b)	0.52	0.67	0.63
totaal	0.58	0.83	0.79

^(a) spits is 7.00-9.00 uur en 16.00-18.00 uur

^(b) bij intercity's zijn sneltreinen inbegrepen

Voor de **HSL** (HogeSnelheidsLijn) gelden als gevolg van de hogere snelheden, hogere (veronderstelde) bezettingsgraden, grotere afstanden tussen haltes en de nieuwere technieken andere waarden voor het energiegebruik per treinkilometer. NEA geeft voor het directe energiegebruik een waarde van 176 MJ/treinkm bij een gemiddelde snelheid van 145 km/h. Bij 400 zitplaatsen en gemiddeld 260 passagiers komt het energiegebruik per reizigerkilometer neer op 0.68 MJ/rkm (Tensen, 1996). In een studie van de EC wordt het energiegebruik van de HSL geschat op ca. 0.6 MJ/rkm in 2010. In een vergelijking met een 'klassieke' trein scoort de HSL in 2010 niet beter. De verhoging van het energiegebruik door de hogere snelheden doet de winst van de hogere bezettingsgraad bij de HSL teniet (EC, 1993). In een studie van het Tinbergen

Instituut worden voor het energiegebruik van treinen en de HSL in het jaar 2030 de waarden 0.30 en 0.35 MJ/rkm gegeven (Rienstra *et al.*, 1995). Hierbij dient te worden opgemerkt dat de waarde voor het energiegebruik van treinen in 1989 in dit rapport 0.35 MJ/rkm bedraagt hetgeen ca. 50% lager is dan de in tabel 3.17 vermelde waarde voor intercity's.

Voor de emissies van personentreinen per reizigerkilometer is gebruikt gemaakt van tabel 3.15 en tabel 3.16. De emissiefactoren per reizigerkilometer zijn voor stoptreinen en intercity's in tabel 3.18 weergegeven.

Tabel 3.18. Emissiefactoren (g/rkm) van personentreinen in 1995

	eenheid	stoptreinen			intercity's	totaal ¹¹
		E	DE	totaal	E	
CO ₂	g/rkm	68.7	79.2	69.9	44.9	56.8
NO _x	mg/rkm	78.8	1345.5	218.1	51.4	128.9
CO	"	7.9	114.9	19.7	5.1	11.9
VOS	"	1.4	74.6	9.5	0.9	4.9
SO ₂	"	31.7	65.9	35.5	20.7	27.7
deeltjes	"	0.1	31.6	3.6	0.1	1.7

De gegevens uit de tabellen 3.17 en 3.18 zijn niet bruikbaar om personenvervoerwijzen met elkaar te vergelijken. Net als bij bus, tram- en metrovervoer moet bij treinvervoer ook rekening worden gehouden met materieelritten en omrijden als gevolg van beperkte infrastructuur. Voor personentreinen wordt in de reeds eerder genoemde NEA-studie verondersteld dat er geen materiaalritten optreden en dat het percentage extra treinkilometers (vergeleken met dezelfde verplaatsing per auto) als gevolg van de beperkte rail-infrastructuur 10% bedraagt (Tensen, 1996). In paragraaf 3.6 waar een vergelijking tussen verschillende personenvervoerwijzen wordt gemaakt zullen deze determinanten worden gebruikt ter correctie van de waarden voor het energiegebruik en de emissies per reizigerkilometer zoals in tabel 3.17 en 3.18 weergegeven.

Toekomst

In de studie van CE, die in deze paragraaf al besproken is, worden ook toekomstige ontwikkelingen gegeven. Ten eerste zal het rendement van elektriciteitscentrales in de toekomst stijgen van 42% in 1996 tot 48% in 2010 (Dings *et al.*, 1995e). De nieuwste gasgestookte centrales hebben op dit moment al een rendement van 55% tegenover 42% van het huidige centralepark (opgebouwd uit 55% gas-, 40% kolen- en 5% kern-energiecentrales) (SEP, 1995). Daarnaast zullen de distributieverliezen afnemen van 10% naar 3% als in 2010 volledig is overgeschakeld naar 25 kV_{ac} (Dings *et al.*,

¹¹ De waarde voor de CO₂-emissiefactor voor treinen totaal komt goed overeen met de waarde 62 g/rkm (voor 1990) zoals vermeld in een eerder verschenen RIVM-rapport ten behoeve van de VNKV (van Wee *et al.*, 1996).

1995e). De verbetering van het rendement in 2010 ten opzichte van 1996 komt hiermee neer op 23%.

Bij diesel-elektrische tractie wordt een verbetering verwacht doordat het piekrendement van de dieselmotor in 2010 gestegen is tot 46% in vergelijking met 42% op dit moment (type: DE 6400) wat neerkomt op een verbetering van het rendement van 10% (Dings *et al.*, 1995e).

De ontwikkeling van de CO₂-emissie per geleverde kWh door elektriciteitscentrales tot 2020 is in het kader van de Vervolgnota Klimaatverandering door het RIVM ingeschat. Voor het jaar 2000 wordt een reductie van 44% ten opzichte van 1990 verwacht. Als voornaamste oorzaken voor deze daling wordt gegeven de toename van het aandeel gas ten koste van kolen, de eerder genoemde rendementsverbeteringen van centrales, het sterk groeiend aandeel elektriciteit uit Warmte Kracht Koppeling (WKK) en de toename van geïmporteerde elektriciteit. Na het jaar 2000 zal echter volgens hetzelfde scenario de CO₂-emissie per kWh weer **toenemen** als gevolg van een weer toenemend aandeel kolen, een sterke afname van de import van elektriciteit en een afname van het aandeel elektriciteit uit WKK. In 2020 is volgens deze studie de CO₂-emissie van elektriciteitscentrales in Nederland ca. 20% **hoger** dan in 2000 maar nog altijd 34% lager dan in 1990 (van Wee *et al.*, 1996).

De NO_x-emissies door treinverkeer in de toekomst zullen in de prognoses van CE voor DE-tractie relatief meer afnemen dan voor E-tractie. De NO_x-emissiereductie bij de elektriciteitscentrales tussen 1996 en 2010 wordt op 33% geschat terwijl de NO_x-emissiereductie bij de dieselmotor 60% bedraagt (Dings *et al.*, 1995e). De reductie van andere emissies bij elektrische tractie in 2010 ten opzichte van 1996 zijn af te leiden uit tabel 3.7, paragraaf 3.3.

3.6. Vergelijking tussen personenvervoerwijzen in 1995

Energiegebruik per personenvervoerwijze

Op basis van de waarden voor het directe energiegebruik van de verschillende vervoerwijzen zoals afgeleid in paragraaf 3.2 t/m 3.5 kan een vergelijking worden gemaakt tussen het energiegebruik van de verschillende personenvervoerwijzen. Een vergelijking op grond van deze afleiding is echter niet geheel rechtvaardig. De waarden representeren namelijk het energiegebruik van vervoerwijzen op het moment dat er daadwerkelijk reizigers worden vervoerd¹². De aanname geldt dus dat de beladingsgraad naar afstand 100% bedraagt. Met name bij het openbaar vervoer speelt het leeg

¹² Deze stelling geldt met uitzondering van personentreinen, waar het energiegebruik is bepaald door het totaal energiegebruik te delen door het aantal nuttige (met passagiers) treinkilometers.

af- en aanrijden van de remise naar het beginpunt en vice versa een grote rol in het energiegebruik per reizigerkilometer. Dit percentage is door het NEA voor openbaarvervoerbussen op 7% geschat, voor trams op 4.5% en voor metro's op 3%. Touringcars moeten doorgaans leeg terugrijden vanaf de eindbestemming of leeg naar de opstapplaats. De schatting voor dit percentage kilometers ten behoeve van af- en aanrijden op het totaal door touringcars afgelegde kilometers bedraagt 24% (Tensen, 1995).

Een andere determinant die in de vergelijking meespeelt is de vraag of een reiziger in een reis van A naar B meer kilometers maakt als hij met bijvoorbeeld de bus gaat dan wanneer hij met de auto rijdt. Dit vanwege de grofmazigheid van infrastructuur (rail) en routes (bus) ten opzichte van de auto-infrastructuur. Tensen noemt voor openbaar vervoer per bus een omrijpercentage van 25%. Deze waarde geldt voor een combinatie van stads- en streekbussen. Er bestaat een vermoeden dat het omrijpercentage van streekbussen lager is dan dat van stadsbussen. Aangezien er geen bron is gevonden die dit vermoeden kan bevestigen wordt de waarde 25% aangehouden voor zowel stads- als streekbussen. Touringcars rijden relatief minder kilometers om dan stads- en streekbussen. In beginsel kunnen ze de kortste route nemen. Soms zullen ze echter moeten omrijden om mensen op verschillende plaatsen op te halen. De waarde 6% wordt gehanteerd. Voor treinen, trams en metro's wordt voor dit percentage 10% aangenomen. Voor de auto geldt 0% (Tensen, 1995).

Naast het feit dat bij gebruik van het openbaar vervoer veelal meer kilometers worden afgelegd dan bij het gebruik van de personenauto, is er het fenomeen voor- en natransport dat voornamelijk bij treinreizen optreedt. De mate waarin dit voor- en natransport met de personenauto wordt verricht is bepalend voor het verschil tussen een reis per auto en een reis per trein (inclusief voor- en natransport). Uit NS-gegevens blijkt dat in 1993 ca. 9% van de reizigers per auto naar het station is gereisd, 26% per bus/tram/metro en 65% lopend of (brom)fietsend. Het natransport geeft een vergelijkbaar beeld (NS, 1993). Het voor- en natransport betreft voornamelijk korte afstanden waarbij een personenauto voornamelijk met koude of opwarmende motor rijdt. Het energiegebruik en de emissies van vooral CO en VOS zijn bij koude motor hoger zijn dan de landelijk gemiddelde waarden. Aangezien het voor- en natransport in slechts ca. 9% van de gevallen met de auto wordt verricht en het aantal reizigerkilometers ten behoeve van voor- en natransport ten opzichte van het aantal met de trein afgelegde reizigerkilometers relatief klein is, is deze determinant niet in het energiegebruik en emissies van de trein betrokken.

De hierboven genoemde determinanten in ogenschouw genomen kan het energiegebruik per reizigerkilometer van de verschillende personenvervoerwijzen naast elkaar afgezet worden. In tabel 3.19 is deze vergelijking weergegeven.

Kijkend naar tabel 3.19 lijkt het duidelijk dat stadsvervoer per auto iets meer energie kost dan stadsvervoer per stadsbus en veel meer dan stadsvervoer per tram of metro.

Bij de huidige bezettingsgraden gebruikt de stoptrein iets minder energie per reizigerkilometer dan de streekbus die op zijn beurt iets minder gebruikt dan de personenauto als deze wordt gebruikt voor sociaal-recreatieve doeleinden.

Voor langere afstanden, bijvoorbeeld voor binnenlandse vakanties of excursies, scoort de touringcar veel beter dan de personenauto, zelfs als zou worden aangenomen dat de auto het maximaal aantal passagiers vervoert (= 5). De intercity zit hier wat energiegebruik betreft tussenin.

Emissiefactoren per vervoerwijze

De emissies per reizigerkilometer zoals per personenvervoerwijze in de paragrafen 3.2 t/m 3.5 zijn bepaald worden samengevat in tabel 3.20. De waarden zoals in paragrafen 3.2 t/m 3.5 zijn verhoogd met factoren voor omrijden en af- en aanrijden zoals die in tabel 3.19 en 3.20 voor de verschillende vervoerwijzen zijn gegeven. Voor de volledigheid: bij vervoermiddelen voortbewogen door verbrandingsmotoren is ook de emissie door de raffinaderij betrokken in de emissiefactor. Bij treinen trams en metro's betreft het de emissie door de elektriciteitscentrale. Zie voor meer informatie over de afleiding van de emissiefactoren de desbetreffende paragraaf.

In tabel 3.20 is te zien dat al het wegverkeer het in 1995 bijna per definitie af moet leggen tegen het railvervoer. Alleen met uitzondering van het energiegebruik (en dus de CO₂-emissie) en de SO₂-emissie is de touringcar in het voordeel ten opzichte van de trein. Vergelijkingen tussen wegverkeer leiden tot de conclusie dat de stadsbus beter scoort dan de personenauto tijdens stadsgebruik voor wat betreft CO₂-, CO- en VOS-emissie maar dat de andere emissiefactoren bij de stadsbus hoger zijn dan die van de personenauto in een stadsrit. De voornaamste oorzaak is het verschil in brandstofmix tussen personenauto's en bussen (meer diesel).

Energiegebruik en emissies m.b.t. verandering modal-split

Indien het milieurendement (verandering van energiegebruik en emissies door personenvervoer) van een verandering van de modal-split van de vervoerwijzen moet worden berekend, spelen twee aspecten een rol:

1. Er kan worden uitgegaan van geaggregeerde gemiddelden, of gemiddelden van specifieke 'deelverzamelingen' (bijvoorbeeld naar ritmotief of type voertuig, zoals stoptreinen en intercity's). De berekende gegevens staan vermeld in tabel 3.19.
2. Er kan worden uitgegaan van een berekening op basis van verschillen tussen gemiddelde waarden voor de verschillende vervoerwijzen (geaggregeerd of gedesaggregeerd) maar ook van marginale effecten. In het laatste geval wordt er specifiek gekeken naar wat er gaat veranderen.

Over punt 2 enkele opmerkingen:

- Tijdens uren dat treinen of bussen niet vol zitten levert iedere passagier die van de auto naar de trein of bus overstapt meer milieuwinst (= daling energiegebruik en/of emissies) op dan het gemiddelde verschil in energiegebruik/emissiefactoren tussen auto en trein. De autokilometers vervallen en het aantal treinkilometers wordt niet verhoogd. De winst is dus vrijwel gelijk aan het energiegebruik/emissies van de auto per reizigerkilometer maal het aantal afgelegde reizigerkilometers.
- Bij de huidige dienstregeling en capaciteit kan slechts een deel van de automobilisten overstappen naar trein of bus hetgeen aangeeft dat - binnen het huidige openbaar-vervoerstelsel - de energiewinst een bovengrens heeft. Het aantal reizigerkilometers dat per trein op Nederlands grondgebied werd afgelegd bedroeg in 1995 ca. 14 mld, het aantal reizigerkilometers per auto ca. 147 mld (CBS-statistiek van het personenvervoer, 1995). Gegeven de gemiddelde bezettingsgraad van de trein van 37% in 1995 (NS, 1996) waren er in 1995 24 mld lege zitplaatskilometers in de trein. De suggestie zou hiermee gewekt kunnen worden dat bij de huidige dienstregeling dus maximaal 24 mld reizigerkilometers van de auto naar de trein kunnen verschuiven. Aangezien echter de bezettingsgraad tijdens de spits in de randstad veel hoger ligt dan de jaarlijkse gemiddelde waarde van 37% zal al bij een kleine verschuiving van auto naar trein de bezettingsgraad van de spitsrein in de randstad de 100% bereiken. Zonder capaciteitsuitbreiding om deze spitsdrukte op te vangen zal de maximum verschuiving van reizigerkilometers veel lager zijn dan de theoretische 24 mld.
- Wanneer er extra treinreizigers in de spits bijkomen moeten de treinen veelal worden verlengd. Het is denkbaar dat de extra treinstellen niet meteen kunnen worden afgekoppeld zodra ze niet meer nodig zijn. Het gevolg is een lagere gemiddelde bezettingsgraad. Berekening van het milieurendement op basis van genoemde marginale effecten geeft dan een, in verhouding tot de eerdere berekeningswijze, ongunstiger resultaat. Versterkingsritten bij het busvervoer tijdens de spits is een vergelijkbaar fenomeen. De versterkingsritten kunnen echter eenvoudiger vervallen zodra het passagiersaanbod laag is.

Tabel 3.19. *Energiegebruik (MJ/rkm) van personenvervoer in 1995 (incl. brandstof- en elektriciteitsproductie)*

	auto				bus				tram		metro		trein		totaal ^(e)	
	woon-werk		stadsrit ^(c)	soc.-recre.	gemid.	stad	streek	OV ^(d)	tour	stoptrein	intercity	tram		metro		
	woon-werk	stadsrit										stoptrein	intercity			
E/voertuigkm ^(a)	2.66	3.54	3.54	2.66	2.66	17.3	13.2	14.3	7.9	9.4 ^(f)	16.2 ^(f)	42.4	36.7	39.8		
E/voertuigkm ^(b)	2.95	3.93	3.93	2.95	2.95	18.5	14.1	15.3	8.4	24.9	42.9	112	97	105		
aantal passagiers (-)	1.15	1.65	1.65	1.84	1.65	13.1	13.7	13.5	31.7	32	52	116	155	133		
af- en aanrijden (%)	0	0	0	0	0	7	7	7	24 ^(e)	4.5	3	0	0	0		
omrijpercentage (%)	0	0	0	0	0	25	25	25	6	10	10	10	10	10		
E/reizigerskm (MJ/rkm)	2.56	2.37	2.37	1.60	1.78	1.86	1.36	1.52	0.35	0.95	0.93	1.06	0.69	0.87		

^(a) betreft het energiegebruik in de vorm van de energie-inhoud van de brandstof of in de vorm van energie uit de bovenleiding

^(b) betreft het directe energiegebruik dus inclusief het energiegebruik voor raffinage of voor elektriciteitsproductie. Voor de in 1995 geldende mix van brandstoffen gebruikt door personenauto's geldt dat gemiddeld 1.11 MJ energie nodig is om 1 MJ brandstof te produceren. Voor dieselsbussen en diesellocomotieven geldt dat gemiddeld 1.067 MJ energie nodig is om 1 MJ dieselbrandstof te produceren. Voor elektriciteit is 2.64 MJ energie in de vorm van brandstof in de elektriciteitscentrale nodig om 1 MJ energie aan de bovenleiding te produceren (zie paragraaf 3.5).

^(c) het energiegebruik van een personenauto's in de stad volgens CBS in 1995, gewogen naar benzine, diesel en LPG (67:18:15) ervan uitgaande dat de bezetting voor korte stadstritten gelijk is aan het landelijk gemiddeld aantal passagiers per personenauto over alle reismotieven.

^(d) Openbaar Vervoer per bus is een weging van streek- en stadsbussen op basis van reizigerkilometers. Het percentage reizigerkilometers in het Openbaar-Busvervoer door streekbussen bedroeg in 1995 72%, het overblijvende deel van 28% dus door stadsbussen (zie tabellen 3.8 en 3.9).

^(e) de relatief hoge waarde voor het percentage af- en aanrijden van het leeg terug rijden van de eindbestemming of het leeg heenrijden naar de beginbestemming, vervoer zich kenmerkt door een lage beladingsgraad naar afstand (= 70%) als gevolg van het leeg terug rijden van de eindbestemming of het leeg heenrijden naar de beginbestemming.

^(f) data van NEA (Tensen, 1996)

^(g) naar jaarkilometrage gewogen gemiddelde van stoptreinen en intercity's (zie paragraaf 3.5)

Tabel 3.20. *Emissiefactoren (g/rkm) van personenvervoer in 1995 (incl. brandstof- en elektriciteitsproductie)*

	auto				bus				tram		metro		trein		totaal ^(b)	
	woon-werk		stadsrit	soc.-recre.	gemiddeld	stad	streek	OV ^(a)	tour	stoptrein	intercity	tram		metro		
	woon-werk	stadsrit										stoptrein	intercity			
CO ₂	185	172	116	129	137	100	110	25	68	67	77	49	63			
NO _x	1.12	0.59	0.70	0.78	1.87	1.46	1.58	0.40	0.08	0.08	0.24	0.06	0.14			
CO	3.95	5.79	2.47	2.75	0.89	0.49	0.60	0.09	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01			
VOS	0.62	0.92	0.39	0.43	0.79	0.43	0.53	0.07	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01			
SO ₂	0.13	0.12	0.08	0.09	0.17	0.12	0.13	0.03	0.03	0.03	0.04	0.02	0.03			
deeltjes	0.05	0.05	0.03	0.03	0.19	0.12	0.14	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00			

^(a) Openbaar Vervoer per bus is een weging van streek- en stadsbussen op basis van reizigerkilometers. Het percentage reizigerkilometers in het Openbaar-Busvervoer door streekbussen bedroeg in 1994 72%, het overblijvende deel van 28% dus door stadsbussen (zie tabellen 3.8 en 3.9).

^(b) naar jaarkilometrage gewogen gemiddelde van stoptreinen en intercity's (zie paragraaf 3.5)

3.7. Vergelijking tussen personenvervoerwijzen in 2010

Op basis van prognoses die ten behoeve van de MV4-knelpuntenanalyse zijn gedaan wordt een indicatie gegeven voor het energiegebruik en de emissiefactoren van de verschillende personenvervoerwijzen in 2010. In dit toekomstbeeld zijn alleen verbeteringen als gevolg van technische maatregelen verondersteld. Deze technische maatregelen worden uitgevoerd als gevolg van aanscherping van emissiewetgeving of als gevolg van autonome technologische veranderingen. In de MV4-knelpuntenanalyse is alleen die emissiewetgeving betrokken die volgens VROM medio 1996 naar grote waarschijnlijkheid in de periode 1995-2005 van kracht zullen worden (Geurs *et al.*, 1997, in voorbereiding).

Voor wat betreft technische maatregelen moet gedacht worden aan verbeteringen van het rendement van elektriciteitsproductie, brandstofproductie en van verbrandings- en elektromotoren en aan verlaging van emissiefactoren als gevolg van technische maatregelen aan raffinaderijen, elektriciteitscentrales en verbrandingsmotoren. Het aantal passagiers per vervoermiddel, het percentage af- en aanrijden en het omrijpercentage zijn in 2010 gelijk verondersteld aan 1995. Tabel 3.21 geeft een overzicht.

Duidelijk wordt hiermee dat, zonder verbeteringen van de bezettingsgraden, het milieuvoordeel van de bus ten opzichte van de auto zal verkleinen vergeleken met 1995. Bij een vergelijking tussen de emissies tussen een stadsrit per auto en per stadsbus blijkt dat in 2010 de emissie per reizigerkilometer van CO₂, CO en SO₂ van de auto nog hoger zullen zijn dan die van de stadsbus. De andere beschouwde emissiefactoren zullen lager zijn. Vergelijking tussen het railvervoer en de personenauto leiden in alle gevallen nog steeds tot de conclusie dat de personenauto in bijna alle situaties hogere emissies per reizigerkilometer zal hebben. Dit met uitzondering van de NO_x-emissiefactor die bij stoptreinen ongeveer dezelfde waarde zal hebben als bij personenauto's.

Ook hier blijft natuurlijk gelden dat de overstap van auto naar trein of bus van een automobilist, bij de huidige bezettingsgraden in het openbaar vervoer, per definitie in een milieuvoordeel resulteert. Daarnaast zal een grote verschuiving van auto naar openbaar vervoer tot een significante verhoging van de bezettingsgraden in het openbaar vervoer leiden, hetgeen de milieubelasting per reizigerkilometer van het openbaar vervoer navenant verlaagt.

Nogmaals tabel 3.21 is slechts een indicatie voor wat er door middel van uitvoering van de huidige (medio 1996) beleidsvoornemens (voor wat betreft emissienormering en brandstofkwaliteit) zal veranderen in de milieubelasting van de afzonderlijke personenvervoerwijzen.

Tabel 3.21. *Energiegebruik (MJ/rkm) en emissiefactoren (g/rkm) van personenvervoer in 2010 (incl. brandstof- en elektriciteitsproductie)*

	auto			bus				tram			metro			trein			totaal ^(a)
	woon-werk	stadsrit	soc.-recr.	gemiddeld	stad	streek	tour	tram	metro	stop-trein	intercity	totaal	stop-trein	intercity	totaal		
Energie	2.18	2.02	1.36	1.52	1.69	1.23	0.31	0.76	0.74	0.95	0.61	0.77	0.95	0.61	0.77		
CO ₂	155	144	97	108	125	91	23	57	56	72	46	58	72	46	58		
NO _x	0.20	0.11	0.13	0.14	1.15	0.90	0.25	0.05	0.05	0.12	0.04	0.08	0.12	0.04	0.08		
CO	0.69	0.99	0.43	0.48	0.61	0.34	0.06	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01		
VOS	0.18	0.25	0.11	0.12	0.45	0.24	0.04	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00		
SO ₂	0.04	0.04	0.02	0.03	0.03	0.02	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01		
deeltjes	0.01	0.01	0.01	0.01	0.09	0.06	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		

^(a) de verdeling stoptreinen en intercity's en het aandeel diesel-elektrische tractie is gelijk aan 1995 verondersteld

4. GOEDERENVERVOER

4.1. Inleiding

In dit hoofdstuk wordt de aangetroffen literatuur over parkenergie- en parkemissiefactoren¹³ voor goederenvervoerwijzen behandeld en zullen de voor dit moment meest realistisch waarden hiervoor worden afgeleid. De goederenvervoerwijzen die in dit hoofdstuk worden behandeld zijn de bestelauto, de vrachtauto, de trekker (met oplegger), de goederentrein en het binnenschip. Energiegebruik en emissies door deze goederenvervoerwijzen worden in dit hoofdstuk uitgedrukt als energiegebruik en emissies per tonkilometer.

In paragraaf 4.2 t/m 4.5 wordt geïnventariseerd wat de huidige (1995) energie- en emissiefactoren per vervoerde tonkilometer zijn en hoe de toekomstige ontwikkelingen (tot 2010) deze factoren beïnvloeden. Allereerst zal conform hoofdstuk 3 het energiegebruik en de emissies per door het vervoermiddel afgelegde kilometer worden afgeleid. Het zal in dit hoofdstuk gaan over het directe energiegebruik en emissies wat inhoudt dat ook het energiegebruik en de emissies als gevolg van de productie van brandstof en elektriciteit is verrekend. Daarna zal met behulp van de beladingsgraad naar inhoud (eigenlijk naar massa) het energiegebruik en de emissies per tonkilometer worden bepaald.

In paragraaf 4.6 worden de beschouwde goederenvervoerwijzen met elkaar vergeleken voor wat betreft het energiegebruik en de emissies per tonkilometer. De aspecten die hierbij een rol kunnen spelen worden toegelicht.

4.2. Bestelauto's

per voertuigkilometer

Het energiegebruik en de emissies per voertuigkilometer door bestelauto's¹⁴ is overgenomen van CBS. Voor 1995 staan de waarden vermeld in tabel 4.1.

¹³ Het zal dus gaan om energie- en emissiefactoren van het gehele park (of vloot wanneer het schepen betreft) opgebouwd uit vervoermiddelen van alle leeftijden.

¹⁴ Voertuigen voor goederenvervoer met een maximaal gewicht inclusief lading van 3.5 ton

Tabel 4.1. Energiegebruik (MJ/km) van bestelauto's in 1995 (excl. raffinage ^(a))

	stad	landelijke weg	autosnelweg	totaal
benzine	3.84	2.40	2.95	3.23
diesel	4.14	2.76	3.45	3.59
LPG	3.46	2.31	2.66	2.96
gemiddeld ^(b)	4.07	2.69	3.35	3.51

^(a) inclusief raffinage van brandstof worden de waarden een factor 1.119 hoger voor bestelauto's op benzine, 1.067 hoger voor bestelauto's op diesel en 1.097 voor bestelauto's op LPG (Rijkeboer *et al.*, 1992)

^(b) Gewogen naar aandeel kilometers door benzine, diesel en LPG bestelauto's in 1995 (=16:80:4%)

De emissiefactoren 'aan de pijp' uit tabel 4.2 in zijn rechtstreeks overgenomen van CBS (CBS-emmob, 1995). De emissiefactoren inclusief raffinage zijn bepaald aan de hand van TNO (Rijkeboer *et al.*, 1992)

Tabel 4.2. Emissiefactoren (g/km) van bestelauto's in 1995

	'aan de pijp'				inclusief raffinage			
	benzine	diesel	LPG	totaal ^(a)	benzine	diesel	LPG	totaal ^(a)
CO ₂	233	263	196	256	263	282	211	277
NO _x	2.37	1.08	2.27	1.31	2.40	1.10	2.29	1.33
CO	11.40	0.90	3.00	2.40	11.41	0.90	3.00	2.40
VOS	1.86	0.28	1.42	0.54	1.86	0.28	1.42	0.54
SO ₂	0.034	0.255	0.000	0.215	0.172	0.342	0.070	0.308
deeltjes	0.035	0.287	0.012	0.242	0.042	0.291	0.015	0.246

^(a) Gewogen naar aandeel kilometers door benzine, diesel en LPG bestelauto's (= 16% : 80% : 4%)

per tonkilometer

Volgens de meest recente inschattingen van TNO (van de Venne *et al.*, 1996) bedraagt het laadvermogen van bestelauto's (GVW 3.5 ton) maximaal 1.55 ton. Het gemiddeld laadvermogen van Nederlandse bestelauto's blijkt in 1993 volgens CBS 1.1 ton te zijn (Statistiek van het binnenlands goederenvervoer over de weg). De beladingsgraad naar inhoud van bestelauto's voor binnenlands vervoer in 1993 gelijk aan 47.2% en de beladingsgraad naar afstand 67.8%. Voor 1995 is verondersteld dat de beladingsgraden gelijk zijn aan die in 1993. Het energiegebruik per tonkilometer van de gemiddelde bestelauto's voor binnenlands vervoer in 1995 komt hiermee op 10.0 MJ/tonkm. Inclusief raffinage van de brandstof zal deze waarde 10.7 MJ/tonkm worden (Rijkeboer *et al.*, 1992). Een opsplitsing van het energiegebruik per tonkilometer is weergegeven in tabel 4.3.

Tabel 4.3. *Energiegebruik (MJ/tonkm) van bestelauto's in 1995 (incl. raffinage)*

benzine	10.3
diesel	10.9
LPG	9.2
gemiddeld ^(a)	10.7

^(a) Gewogen naar aandeel kilometers benzine, diesel en LPG bestelauto's in 1995 (= 16% : 80% : 4%)

De emissiefactoren (in g/tonkm) staan vermeld in tabel 4.4. Met de emissiefactoren in g/km uit tabel 4.2 kunnen met behulp van de verhouding tussen het energiegebruik in MJ/km (tabel 4.1) en MJ/tonkm (tabel 4.3) de emissiefactoren in g/tonkm worden bepaald.

Tabel 4.4. *Emissiefactoren (g/tonkm) van bestelauto's in 1995*

	'aan de pijp'				inclusief raffinage			
	benzine	diesel	LPG	totaal ^(a)	benzine	diesel	LPG	totaal ^(a)
CO ₂	662	747	557	727	748	802	601	786
NO _x	6.73	3.07	6.45	3.72	6.82	3.12	6.49	3.78
CO	32.39	2.56	8.52	6.82	32.41	2.57	8.53	6.83
VOS	5.28	0.80	4.03	1.53	5.29	0.80	4.04	1.54
SO ₂	0.10	0.72	0.00	0.61	0.49	0.97	0.20	0.88
deeltjes	0.10	0.82	0.03	0.69	0.12	0.83	0.04	0.70

^(a) Gewogen naar aandeel kilometers door benzine, diesel en LPG bestelauto's (= 16% : 80% : 4%)

De emissiefactoren inclusief de raffinage van brandstoffen zijn op dezelfde manier verkregen als bij personenauto's (zie paragraaf 3.2).

toekomst

Ten behoeve van de MV4 heeft TNO een inschatting gegeven voor de ontwikkeling van energie-efficiency en emissiefactoren van bestelauto's (van de Venne *et al.*, 1996). De inschatting voor de toename van de energie-efficiency van het bestelauto-park is 22% in 2010 ten opzichte van 1995. De verbetering van de emissiefactoren is te vinden in tabel 4.5. Verondersteld is dat nieuwe aanscherpte emissie-eisen voor nieuwe bestelauto's omstreeks 2000 van kracht worden. De emissiefactoren in 1995 zijn gelijk gesteld aan 100.

Tabel 4.5. Relatieve parkemissiefactor (g/km) van bestelauto's in 2010 (1995 = 100)

	benzine	diesel	LPG
NO _x	13	65	33
CO	60	89	92
VOS	16	36	62
deeltjes	20	35	17

bron: ATTACK 2.0 (Bus *et al.*, 1996)

4.3. Vrachtauto's en Trekkers

per voertuigkilometer

Voor vrachtauto's wordt het brandstofverbruik, conform de EU-emissiewetgeving, vaak uitgedrukt in g/kWh omdat testen worden uitgevoerd aan alleen de motoren op een motorproefstand. Een omrekening van brandstofverbruik per aan de krukas geleverde energie (g/kWh) naar energiefactoren per afgelegde kilometer (MJ/km) zal later in deze paragraaf voor vrachtauto's worden uitgewerkt. Deze omrekening wordt ook gebruikt om de emissiefactoren die uitgedrukt zijn in g/kWh om te rekenen naar g/km.

Voor het specifieke energiegebruik van en de emissies door vrachtauto's en trekkers is nauwelijks één getal te noemen. De variatie binnen de categorieën vrachtauto's en trekkers is groot: er zijn vele soorten vrachtauto's en trekkers, variërend van voertuigen, nauwelijks groter dan een bestelwagen, tot voertuigen van bijvoorbeeld 50 ton GVW (Gross Vehicle Weight; het maximaal toelaatbare gewicht wat gelijk is aan het eigen gewicht van vrachtauto of trekker + belading). De variatie is sterk aan vervoerskundige karakteristieken gekoppeld, en veel groter dan bij personenauto's. Door de variatie is de bruikbaarheid van een getal representatief voor alle vrachtauto's en trekkers beperkt. Vooral bij vrachtauto's zijn er grote verschillen in de GVW-waarde. Kleine vrachtauto's (< 10 ton GVW) ten behoeve van stadsdistributie verbruiken minder energie per gereden kilometer dan grote vrachtauto's (> 20 ton GVW) met aanhanger die worden ingezet voor internationaal transport.

In dit rapport wordt voor het energiegebruik gebruik gemaakt van de nieuwste inzichten van TNO. Deze nieuwe inzichten zijn verwerkt in het AVV/RIVM-model Attack2.0 voor de huidige stand van zaken en de toekomstige ontwikkeling van het goederenvervoer. Aangezien TNO ook voor de huidige CBS-gegevens de basis is geweest, zullen deze nieuwe inzichten hoogstwaarschijnlijk voor de toekomst door CBS worden overgenomen. Een onderscheid is gemaakt naar een beladingsgraad van 100% en de werkelijk beladingsgraad (naar inhoud) om de invloed van belading op het energiegebruik duidelijk te maken.

Tabel 4.6. *Energiegebruik (MJ/km) volgens TNO in 1995 (excl. raffinage^(a))*

		vrachtauto's			trekkers
		3.5-10 ton	10-20 ton	> 20 ton	
gemiddeld GVW	ton	7.1	14.5	36.4	39.2
eigen voertuigmassa	ton	2.7	4.9	11.4	12.2
laadvermogen ^(c)	ton	4.4	9.6	25.0	27.0
Energiegebruik bij maximum belading	MJ/km	5.2	8.3	15.0	15.9
beladingsgraad naar inhoud ^(b)	%	51.2	54.2	62.7	64.4
Energiegebruik bij gemiddelde belading	MJ/km	4.6	7.2	12.9	13.6

bron: TNO-WT (van de Venne *et al.*, 1996), NEI (Bus *et al.*, 1996)

^(a) inclusief raffinage van brandstof worden de waarden een factor 1.067 hoger (Rijkeboer *et al.*, 1992)

^(b) de beladingsgraad naar inhoud is gelijk aan de waarden voor 1993 zoals vermeld in tabel 4.8 voor binnenlands beroepsgoederenvervoer door Nederlandse bedrijfsvoertuigen in 1993

^(c) het gemiddeld laadvermogen per laadvermogenklasse voor beroepsgoederenvervoer met Nederlandse bedrijfsvoertuigen volgens NEI (Bus *et al.*, 1996)

Uit bovenstaande tabel blijkt dat de invloed van de beladingsgraad op het energiegebruik redelijk groot is. Het energiegebruik bij gemiddelde belading is 15-20% lager in vergelijking tot maximaal beladen voertuigen. De waarde die CBS opgeeft voor de gemiddelde vrachtauto's van 12.0 MJ/km is vergeleken met TNO redelijk hoog. De reden hiervoor is niet bekend. Voor trekkers is de CBS-waarde van 13.3 MJ/km nagenoeg overeenkomstig de TNO-waarde.

Voor de emissies van vrachtauto's en trekkers 'aan de pijp' is in het onderhavige rapport gebruik gemaakt van de emissiefactoren volgens CBS (CBS emmob, 1995). In tabel 4.7 is een overzicht gegeven. Een correctie is uitgevoerd voor het verschil in energiegebruik zoals gegeven door CBS en die zoals in tabel 4.6 (zie voetnoot bij tabel 4.7). De emissiefactoren inclusief raffinage zijn verkregen met behulp van gegevens over de emissiefactoren van raffinaderijen van TNO (Rijkeboer *et al.*, 1992). De reden dat voor de emissiefactoren 'aan de pijp' niet van de TNO-inzichten gebruik is gemaakt is dat het model Attack2.0 op het moment van schrijven van dit rapport (nog) geen betrouwbare resultaten te zien gaf. Bovendien zou een handmatige rekenexercitie, zoals hierboven voor het energiegebruik is verricht, voor de emissiefactoren een zeer grote hoeveelheid extra werk zou zijn geweest en dat niet binnen het tijdsbestek van deze studie kon worden verricht. Een andere reden is dat de keuze tot gevolg heeft dat de waarden gelijk zijn aan die welke (waarschijnlijk) door de AVV in het EEB-systeem worden opgenomen. Voor de emissiefactoren die verkregen zijn met deze nieuwe TNO-inzichten wordt verwezen naar het model Attack2.0 dat halverwege

1997 bij het RIVM en de AVV zal gaan worden gebruikt om de toekomstige milieubelasting van bedrijfsvoertuigen te bepalen.

Tabel 4.7. Emissies (g/km) vrachtauto's en trekkers afgeleid van CBS in 1995

	'aan de pijp'		inclusief raffinage ^(a)	
	vrachtauto ^(b)	trekker	vrachtauto ^(b)	trekker
CO ₂	672	937	721	1006
NO _x	8.17	13.75	8.21	13.82
CO	2.04	4.14	2.05	4.16
VOS	1.38	3.29	1.39	3.30
SO ₂	0.65	0.91	0.88	1.22
deeltjes	0.47	0.58	0.48	0.59

bron: CBS-emma (1995), TNO (Rijkeboer *et al.*, 1992), TNO (van de Venne *et al.*, 1996)

^(a) de emissiefactoren volgens CBS zijn gecorrigeerd voor het verschil in energiegebruik tussen CBS en tabel 4.6. Het jaarlijks voertuigkilometrage in 1993 per categorie (= 171 mln, 1235 mln, 1531 mln voor resp. vrachtauto's van 3.5-10 ton, 10-20 ton en > 20 ton) van het beroepsgoederenvervoer met Nederlandse voertuigen wordt gebruikt om het gewogen energiegebruik te berekenen (Bus *et al.*, 1996). Het resultaat is: vrachtauto's: 9.2 MJ/km; trekkers: 12.8 MJ/km (CBS geeft 12.0 resp. 13.3 MJ/km)

^(b) vrachtauto is gedefinieerd aan het naar gemiddeld jaarkilometrage gewogen gemiddelde van de drie eerder genoemde laadvermogenklassen.

In tabel 4.7 is te zien dat alleen de emissiefactoren van CO₂ en SO₂ significant worden verhoogd door het toerekenen van de emissies door de raffinaderij aan de emissies door vrachtauto's en trekkers.

per tonkilometer

In tabel 4.6 is het energiegebruik voor vrachtauto's van verschillende GVW-klassen en van trekkers berekend volgens de nieuwste inzichten van TNO (van de Venne *et al.*, 1996). Het energiegebruik per tonkilometer is voor maximaal en gemiddeld beladen (beladingsgraad naar inhoud in 1993) vrachtauto's en trekkers in tabel 4.8 weergegeven. De waarde representeert het energiegebruik wanneer de vrachtauto beladen is. Er is in eerste instantie geen rekening gehouden met het feit dat vrachtauto's en trekkers ook onbeladen kilometers afleggen, ofwel de beladingsgraad naar afstand is 100% verondersteld.

Tabel 4.8. *Energiegebruik (MJ/tonkm) volgens TNO in 1995 (excl. raffinage ^{a)})*

		vrachtauto's			trekkers
		3.5-10 ton	10-20 ton	> 20 ton	
gemiddeld GVW	ton	7.1	14.5	36.4	39.2
eigen voertuigmassa	ton	2.7	4.9	11.4	12.2
laadvermogen ^(c)	ton	4.4	9.6	25.0	27.0
Energiegebruik bij maximum belading	MJ/tonkm	1.17	0.87	0.60	0.59
beladingsgraad naar inhoud ^(b)	%	51.2	54.2	62.7	64.4
Energiegebruik bij gemiddelde belading	MJ/tonkm	2.03	1.38	0.82	0.78

bron: TNO-WT (van de Venne *et al.*, 1996), NEI (Bus *et al.*, 1996)

^(a) inclusief raffinage van brandstof worden de waarden een factor 1.067 hoger (Rijkeboer *et al.*, 1992)

^(b) de beladingsgraad naar inhoud is gelijk aan de waarden voor 1993 zoals vermeld in tabel 4.8 voor binnenlands beroepsgoederenvervoer door Nederlandse bedrijfsvoertuigen in 1993

^(c) het gemiddeld laadvermogen per laadvermogenklasse voor beroepsgoederenvervoer met Nederlandse bedrijfsvoertuigen volgens NEI (Bus *et al.*, 1996)

Uit tabel 4.8 blijkt dat ongeveer een verdubbeling van de belading (vrachtauto's 3.5-10 ton en vrachtauto's 10-20 ton) niet in een halvering van het energiegebruik resulteert door het feit dat bij een hogere beladingsgraad het energiegebruik per voertuigkilometer stijgt (zie tabel 4.6).

Een reëlere benadering van de bepaling van het energiegebruik per tonkilometer van vrachtauto's en trekkers is het beschouwen van het gemiddelde energiegebruik per voertuigkilometer van de verschillende categorieën en de gemiddelde benutting van vrachtauto's in die betreffende categorie. De benutting is gedefinieerd als het quotiënt van de werkelijke vervoersprestatie in aantal tonkilometers en het aantal gereden kilometers maal het maximaal laadvermogen (= laadvermogentonkilometers). De benutting wordt berekend door de beladingsgraad naar inhoud (of eigenlijk massa) te vermenigvuldigen met de beladingsgraad naar afstand. In Attack2.0 zijn deze beladingsgraden voor 1993 bepaald uit CBS-statistieken voor een drietal categorieën, te weten: eigen goederenvervoer, beroepsgoederenvervoer en overig vervoer met Nederlandse of buitenlandse bedrijfsvoertuigen. In dit rapport is ervoor gekozen alleen het beroepsgoederenvervoer met Nederlandse bedrijfsvoertuigen te beschouwen omdat deze categorie in 1993 85% van het totaal aantal tonkilometers door Nederlandse bedrijfsvoertuigen voor zijn rekening nam (CBS). Voor het jaar 2000 is verondersteld dat de ontwikkelingen met betrekking tot beladingsgraden als gevolg van Europese regelgeving in 2000 zijn uitgekristalliseerd (Bus *et al.*, 1996). Een overzicht is te vinden in tabel 4.9.

Tabel 4.9. Beladingsgraad naar inhoud van binnenlands beroepsgoederenvervoer door Nederlandse bedrijfsvoertuigen in 1993 en prognose voor 2000

	eenheid	vrachtauto's			trekkers
		3.5-10 ton	10-20 ton	> 20 ton	
1993					
laadvermogen	ton	4.4	9.6	25.0	27.0
beladingsgraad naar inhoud	%	52.1	53.0	62.9	64.2
beladingsgraad naar afstand	%	79.8	74.0	67.1	70.1
benuttingsgraad	%	41.6	39.2	42.2	45.0
2000					
laadvermogen	ton	4.1	9.6	25.0	28.5
beladingsgraad naar inhoud	%	52.1	53.0	62.9	64.2
beladingsgraad naar afstand	%	88.2	81.8	74.1	77.5
benuttingsgraad	%	45.9	43.3	46.6	49.7

bron: NEI (Bus *et al.*, 1996)

Combinatie van de waarden voor het energiegebruik uit tabel 4.8 bij werkelijke beladingsgraad naar inhoud en de beladingsgraad naar afstand uit tabel 4.9 en levert de waarden voor het energiegebruik per tonkilometer als in tabel 4.10. Aanname hierbij is dat de beladingsgraden in 1995 gelijk zijn aan die in 1993.

Tabel 4.10. Energiegebruik (MJ/tonkm) van binnenlands beroepsgoederenvervoer met Nederlandse bedrijfsvoertuigen in 1995 (excl. raffinage)

Vrachtauto's			totaal ^(a)	Trekkers	Wegtransport ^(a)
3.5-10 ton	10-20 ton	> 20 ton			
2.54	1.86	1.23	1.57	1.12	1.32

^(a) Het jaarlijks voertuigkilometrage per categorie (= 171, 1235, 1531 en 3691 mln km voor resp. vrachtauto's van 3.5-10 ton, 10-20 ton, > 20 ton en trekkers) van het binnenlands beroepsgoederenvervoer met Nederlandse voertuigen in 1993 wordt gebruikt om het gewogen energiegebruik te berekenen (Bus *et al.*, 1996)

Opgemerkt dient te worden dat in de berekende waarden voor 2000 geen invloed van een eventuele verandering van het brandstofverbruik is meegenomen. De toekomstige ontwikkeling van het brandstofverbruik zal in de volgende paragraaf (toekomst) worden behandeld.

De emissiefactoren in g/tonkm zijn eenvoudig af te leiden uit de combinatie van tabel 4.7 en 4.9. Tabel 4.11 geeft het overzicht.

Tabel 4.11. Emissies (g/tonkm) van Nederlandse vrachtauto's en trekkers voor beroepsgoederenvervoer afgeleid van CBS in 1995

	'aan de pijp'		inclusief raffinage ^(a)	
	vrachtauto	trekker	vrachtauto	trekker
CO ₂	115	82	123	88
NO _x	1.39	1.20	1.40	1.21
CO	0.35	0.36	0.35	0.36
VOS	0.24	0.29	0.24	0.29
SO ₂	0.11	0.08	0.15	0.11
deeltjes	0.08	0.05	0.08	0.05

bron: CBS-emma (1995), TNO (Rijkeboer *et al.*, 1992), TNO (van de Venne *et al.*, 1996), NEI (Bus *et al.*, 1996)

^(a) bij de berekening van de emissiefactoren is gebruik gemaakt van het energiegebruik in 1996 van vrachtauto's en trekkers volgens TNO (tabel 4.6) bij werkelijke beladingsgraad. Het jaarlijks voertuigkilometrage in 1993 per categorie (= 171, 1235, 1531 voor resp. vrachtauto's van 3.5-10 ton, 10-20 ton en > 20 ton) van het binnenlands beroepsgoederenvervoer met Nederlandse voertuigen wordt gebruikt om het gewogen energiegebruik te berekenen (Bus *et al.*, 1996). (vrachtauto's: 9.2 MJ/km; trekkers: 13.1 MJ/km).

Toekomst

Door o.a. de steeds strengere NO_x-emissienormering is het brandstofverbruik van vrachtauto's en trekkers de laatste jaren niet of nauwelijks afgenomen. De verwachting is dat dit brandstofverbruik constant blijft of licht daalt als gevolg van de NO_x-emissiewetgeving die van toepassing is op vrachtauto's, trekkers en bussen (Dings, 1995d)¹⁵. In de MV4-knelpuntenanalyse is verondersteld dat de energie-efficiency (MJ/km) van vrachtauto's in 2010 9% is verbeterd t.o.v. 1995 ondanks verdergaande aanscherpingen van de NO_x-emissienorm (Geurs *et al.*, 1997, in voorbereiding).

Als gevolg van een stijging van de beladingsgraden naar inhoud en afstand tussen 2010 en 1995 (zie Bus *et al.*, 1996) zal de daling het energiegebruik per tonkilometer van vrachtwagens en trekkers oplopen tot ca. 20% in 2010.

Voor wat betreft verbeteringen die in de emissiefactoren van nieuwe vrachtauto's en trekkers in de toekomst zullen worden gerealiseerd kan als leidraad de emissienormering worden genomen. De werkelijke emissiefactoren van nieuwe vrachtauto's zijn volgens een studie van CE lager dan de emissienormering eist. Voor NO_x is dit 5% en voor deeltjes is dit 20% (Dings, 1996). In tabel 4.12 zijn de emissienormen voor zware bedrijfsvoertuigen samengevoegd. Om een vergelijking met tabel 4.7 mogelijk te maken moeten deze emissiefactoren omgerekend worden van g/kWh naar g/km.

¹⁵ Het motorrendement zal niet verbeteren, er is daarentegen wel een vermindering van het brandstofverbruik te verwachten door afname van rol- en luchtweerstand en door een verandering van het rijgedrag (Dings, 1995d).

In een berekening door het RIVM wordt deze omrekening van g/kWh naar g/km gegeven. Het uitgangspunt is dat het maximale motorrendement 42% bedraagt. Met één liter dieselolie (heeft energie-inhoud van 10 kWh) zal de motor dan maximaal 4.2 kWh mechanische energie kunnen leveren. In de praktijk zal de motor niet altijd in het optimale werkpunt (hoogste motorrendement) draaien zodat het gemiddelde motorrendement over een bepaalde rit lager wordt. In de praktijk zal het gemiddelde rendement 37% bedragen, dus één liter dieselolie zal 3.7 kWh mechanische energie aan de krukas opleveren (Eerens, 1996). In een CE-studie is voor deze waarde 35-41% gegeven (Dings, 1996). In het traject tussen motorkrukas en wielen zal een extra verlies van 5% optreden (van de Venne et al., 1996) zodat het gemiddelde rendement (tussen 'brandstoftank' en wielen) uitkomt op 35%.

Een voorbeeld van de omrekening van een emissiefactor in g/kWh naar g/km zal nu worden gegeven. Stel de emissiefactor van VOS is gelijk aan 0.5 g/kWh (mechanische energie aan de krukas = 0.14 g/MJ) en het energiegebruik van bijvoorbeeld een vrachtwagen is 9.2 MJ/km (als energie in de vorm van verbruikte brandstof) dan is de VOS-emissiefactor gelijk aan $0.14 * 0.35 * 9.2 = 0.45$ g/km. Voor vrachtauto's wordt de factor 0.9 (0.45/0.5) in het vervolg van dit rapport als uitgangspunt genomen voor de verhouding tussen de emissiefactor in g/kWh en die in g/km. Voor trekkers zal deze omrekenfactor ten gevolge van het hogere energiegebruik, nl. 12.8 MJ/km, 1.25 bedragen. In tabel 4.12 zijn de toekomstig te verwachten emissienormen omgerekend van g/kWh naar g/km met de in deze alinea berekende factoren.

De snelheid van penetratie van nieuwe voertuigen bepaalt samen met de emissiefactoren van nieuwe voertuigen de emissiefactoren van het vrachtauto- en trekkerpark. In de MV4-knelpuntenanalyse zijn prognoses gedaan voor de verandering van de emissiefactoren van het vrachtauto- en trekkerpark in 2010. Uitgangspunt bij deze prognose is dat na 2000 (Euro3) geen verdere aanscherping van de emissie-eisen voor (diesel)vrachtauto's en trekkers zal plaatshebben. Tabel 4.13 geeft de prognoses. Eventuele toepassing van LPG in het (binnenlands) vrachtvervoer leidt tot veel lagere emissies. Het ruimtegebruik van de gastanks en het feit dat ook met dieselmotoren aan de Euro3-emissie-eisen kan worden voldaan, zijn belangrijkste oorzaken dat (autonome) doorbraak van LPG of CNG niet wordt verwacht.

Uit tabel 4.13 blijkt dat in 2010, bij de huidige beleidsvoornemens, voor NO_x een verbetering van 39% ten opzichte van 1995 wordt bereikt. Voor CO is dit 38%, voor VOS 43% en voor deeltjes 55%.

Tabel 4.12. *Emissienormering zware dieselloertuigen*

Emissie-norm	Stof	Normering (g/kWh)	Normering (g/km) ^(a)		Ingangsdatum
			vrachtauto	trekker	
EURO 0	CO	12.3	11.1	15.4	1-10-'90
	NO _x	15.8	14.2	19.8	
	VOS	2.6	2.3	3.3	
	deeltjes	-	-	-	
EURO 1	CO	4.9	4.4	6.1	1-6-'92
	NO _x	9.0	8.1	11.3	
	VOS	1.23	1.1	1.5	
	deeltjes	0.40 (> 85 kW)	0.36	0.50	
		0.67 (< 85 kW)	0.60	0.84	
EURO 2	CO	4.0	3.6	5.0	1-10-'96
	NO _x	7.0	6.3	8.8	
	VOS	1.1	1.0	1.4	
	deeltjes	0.15 (> 85 kW)	0.14	0.19	
		0.15 (< 85 kW)	0.14	0.19	
EURO 3 ^(b)	CO	2.8	2.5	3.5	1-10-2000
	NO _x	4.9	4.4	6.1	
	VOS	0.8	0.7	1.0	
	deeltjes	0.11 (> 85 kW)	0.10	0.14	
		0.11 (< 85 kW)	0.10	0.14	
EURO 4 ^(b)	CO	1.0	0.9	1.3	1-1-2005
	NO _x	2.5	2.3	3.1	
	VOS	0.4	0.4	0.5	
	deeltjes	0.08 (> 85 kW)	0.07	0.10	
		0.10 (< 85 kW)	0.09	0.13	
EURO 5 ^(b)	CO	0.5	0.5	0.6	1-1-2010
	NO _x	1.5	1.4	1.9	
	VOS	0.2	0.2	0.3	
	deeltjes	0.08 (> 85 kW)	0.07	0.10	
		0.10 (< 85 kW)	0.09	0.13	

^(a) de omrekenfactor tussen g/kWh en g/km is gebaseerd op de aanname dat het aandrijflijnrendement gemiddeld 35% bedraagt en het energiegebruik van vrachtauto's 9.2 MJ/km, van trekkers 12.8 MJ/km

^(b) het betreft hier slechts voornemens (EURO 3) en grove indicaties (EURO 4 en EURO 5) van de geplande emissienormering.

Naast technologische ontwikkeling is ook logistieke optimalisatie van invloed op het energiegebruik en de emissies per vervoersprestatie (tonkm) van vrachtwagens en trekkers. Logistieke optimalisatie verhoogt beladingsgraden naar afstand en volume en daarmee het energiegebruik en emissies per vervoersprestatie. Het NEI heeft ten behoeve van het model ATTACK2.0 ingeschat dat beladingsgraden naar afstand in het

binnenlands beroepsgoederenvervoer in de periode 1993-2000 zullen stijgen met gemiddeld 10%. In het internationaal beroepsgoederenvervoer bedraagt de stijging 5%. Na 2000 zijn de ontwikkelingen die van invloed zijn op de beladingsgraden nagenoeg uitgekristalliseerd. Gedacht moet dan worden aan bijvoorbeeld aan samenwerkingsverbanden en telematica. Van de beladingsgraad naar inhoud in het nationaal en internationaal beroepsgoederenvervoer wordt verwacht dat deze tussen 1993 en 2020 niet meer zal veranderen. De voortgezette daling van de beladingsgraad (ruim 1% per jaar tussen 1980 en 1993) wordt volledig gecompenseerd door een stijging van het volume vervoer (Bus *et al.*, 1996).

Tabel 4.13. *Relatieve parkemissiefactor (g/km) van vrachtvoertuigen in 2010 (1995 = 100)*

	1995	2000	2010
CO	100	92	68
NO _x	100	91	61
VOS	100	86	57
deeltjes	100	81	45

bron: MV4 (Geurs *et al.*, 1997, in voorbereiding)

4.4. Goederentreinen

per treinkilometer

Voor het energiegebruik van goederentreinen per treinkilometer wordt verwezen naar paragraaf 3.5 waar voor personen- en goederentreinen aan de hand van gegevens van NS het specifiek energiegebruik is afgeleid. Voor goederentreinen bedraagt deze waarde 225 MJ/treinkm (inclusief energiegebruik t.b.v. elektriciteitsproductie en -distributie of t.b.v. raffinage). De emissiefactoren in g/treinkm zijn rechtstreeks af te leiden uit het energiegebruik per treinkm. Aangezien emissiefactoren in g/treinkm in het kader van deze studie niet interessant zijn worden in de volgende paragraaf alleen emissiefactoren in g/tonkm gegeven.

per tonkilometer

Aan de hand van de berekening van het energiegebruik per treinkilometer bij het goederenvervoer zoals in paragraaf 3.5 en het gemiddeld aantal vervoerde tonnen per goederentrein (= 367 ton in 1994¹⁶) zoals opgegeven door NS (NS-Jaarverslag, 1994) is het energiegebruik per tonkilometer te berekenen. Deze waarde, 0.61 MJ/tonkm, lijkt gebaseerd te zijn op een beladingsgraad naar afstand van 100%. Aangezien echter

¹⁶ Gegevens over het aantal tonnen per trein worden vanaf jaarverslag 1995 niet meer door NS gepubliceerd.

met het totale geaggregeerde energiegebruik door goederenvervoer is gerekend is de beladingsgraad naar afstand impliciet verrekend. De werkelijke beladingsgraad naar afstand voor goederenvervoer over rail is niet bekend.

De emissies per tonkilometer door elektrische goederentreinen zijn aan de hand van tabel 3.7 in paragraaf 3.3 en het energiegebruik per tonkilometer af te leiden. Dit energiegebruik is bij gebrek aan gegevens niet op te splitsen naar diesel-elektrisch en elektrisch. Voor diesel-elektrische goederentreinen worden de emissiefactoren van CE gebruikt (Dings *et al.*, 1995e). De emissie als gevolg van raffinage van dieselolie zijn in de emissiefactoren verwerkt. Het resultaat staat vermeld in tabel 4.14.

Tabel 4.14. Emissiefactoren en energiegebruik van goederentreinen in 1995 (incl. brandstof- en elektriciteitsproductie)

		diesel-elektrisch	elektrisch	totaal ^(a)
Energiegebruik	MJ/tonkm	0.61	0.61	0.61
Emissie van:				
CO ₂	g/tonkm	45.2	43.6	44.1
NO _x	mg/tonkm	818.8	50.0	279.3
CO	"	69.5	5.0	24.2
VOS	"	45.1	0.9	14.1
SO ₂	"	25.3	20.1	21.7
deeltjes	"	18.4	0.1	5.5

bron: SEP (1995), NS, TNO (Rijkeboer *et al.*, 1992), CE (Dings *et al.*, 1995e)

^(a) het totaal is het naar totaal energiegebruik in 1993 gewogen gemiddelde van diesel-elektrisch (30%) en elektrisch (70%) (zie paragraaf 3.5)

In een theoretische studie door Rutten naar de invloed op het energiegebruik van intermodaal transport wordt een specifiek energiegebruik voor containervervoer per elektrische trein van 0.25 MJ/tonkm gegeven (Rutten, 1995). Het betreft hier het energiegebruik bij constante snelheid (80 km/h) van een trein met 30 wagons. De belading per wagen bedraagt 17.5 ton (totaal 525 ton). Bij 130 km/h is het energiegebruik verdubbeld tot 0.50 MJ/tonkm. Bij het vervoer van lichtere lading (12.2 ton per container) stijgt het energiegebruik bij 80 km/h tot 0.35 MJ/tonkm. Het totaal vervoerde gewicht is dan 366 ton. Deze getallen zijn slechts geldig bij de veronderstelling dat er geen lege kilometers worden afgelegd.

In het RIVM/TNO-rapport over de effecten van de Betuweroute op de CO₂- en NO_x-emissies wordt voor elektrisch goederenrailvervoer een energiegebruik van 0.44 MJ/tonkm in 1990 gegeven. Deze waarde is bepaald aan de hand de veronderstelling dat 80% van alle tonkilometers over de Betuwelijn met elektrische locomotieven wordt afgelegd en dat het rendement van elektriciteitscentrales en elektriciteitsdistributie 40% bedraagt (van Wee *et al.*, 1994).

Toekomst

Als gevolg van verbeteringen in het rendement van het Nederlandse elektriciteitscentralepark zullen de emissies van goederentreinen met elektrisch tractie afnemen. Volgens CE zal het rendement van elektriciteitsproductie in Nederland voor het jaar 2010 ca. 48% bedragen tegen 42% in 1996. Daarnaast zal als gevolg van de overschakeling van 1.5 kV_{dc} naar 25 kV_{ac} het distributierendement (van centrale naar afnamepunt bovenleiding) stijgen van 90 tot 97%. De verbetering van het energiegebruik van elektrische goederentreinen in 2010 ten opzichte van 1996 komt hiermee neer op 23%. Voor een verbetering van het rendement van de elektromotoren wordt geen waarde gegeven (Dings, 1995e). Voor de emissiefactoren van elektrische tractie in 2010 wordt verwezen naar tabel 3.7 in paragraaf 3.3.

Diesel-elektrische goederentreinen zullen volgens CE in 2010 10% minder energie gebruiken dan in 1996. Dit als gevolg van een rendementsverbetering van de gebruikte dieselmotoren. De emissiefactor van NO_x zal in 2010 60% lager zijn dan in 1996, die van SO₂ 38%, en die van deeltjes 67%. De veronderstelling is dat deze reductie door beleid zullen moeten worden gerealiseerd (Dings, 1995e). Dit beleid is op dit moment nog niet bepaald.

In het RIVM/TNO-rapport over de Betuweroute wordt geprognostiseerd dat de NO_x-emissiefactor van elektrisch railgoederenvervoer in 2010 (ER-scenario) is gedaald tot 0.01 g/tonkm ten opzichte van 0.06 in 1990 (83% afname)(van Wee *et al.*, 1994). De daling is gebaseerd op de veronderstelling dat SCR¹⁷ sterk penetreert in het elektriciteitscentralepark. Huidige inschattingen geven een ander beeld van de penetratie van deze technologie. Uit de eerder aangehaalde CE-studie blijkt dat de NO_x-emissiefactor ten opzichte van 1995 in 2010 daalt met ca. 33% (Dings, 1995e).

Ter vergelijking enkele cijfers uit de MV4: de percentuele afname van de NO_x-emissiefactor in 2010 t.o.v. 1995 van andere zogenoemd Betuweroute-gevoelige vervoerwijzen zoals trekkers ligt in de grootte-orde van 40%. De afname bij de binnenvaart (> 1800 ton) is in verhouding klein en bedraagt ca. 6% (Geurs *et al.*, 1997, in voorbereiding).

¹⁷ SCR (Selective Catalytic Reduction) is een katalysator die NO_x reduceert tot O₂ en N₂.

4.5. Binnenvaartschepen

per tonkilometer

In de literatuur zijn geen waarden gevonden over het energiegebruik per vaartuigkilometer van binnenschepen. CE is op het moment van schrijven van dit rapport bezig met een onderzoek naar de huidige en toekomstige milieubelasting van de binnenvaart. Er kon nog geen gebruik worden gemaakt van de resultaten van dit onderzoek. Er zijn wel gegevens over energiegebruik per tonkilometer gevonden zodat een vergelijking met andere goederenvervoerswijzen kan worden gemaakt. Voor binnenvaartschepen worden de emissiefactoren voornamelijk gegeven per eenheid verbruikte brandstof (g/kg). De emissiefactoren per afgelegde kilometer worden berekend met behulp van het brandstofverbruik per tonkilometer.

Voor binnenvaartschepen is het energiegebruik per tonkilometer afgeleid aan de hand van het model BARGE dat het goederenvervoer per binnenschip en het daarmee samenhangende brandstofverbruik en emissies tot het jaar 2020 prognosticeert. Ten behoeve van dit model zijn door NEA verbruiks- en emissiecijfers voor de binnenvaart bepaald (NEA, 1995). Hiermee is het totale brandstofverbruik per laadvermogenklasse berekend en gedeeld door de tonkilometerprestatie van de binnenvaart op Nederlands territorium. In tabel 4.15 is het resultaat te zien.

Tabel 4.15. *Energiegebruik van binnenschepen 1993 (excl. raffinage^(a))*

	eenheid	laadvermogenklasse							gemid
		< 200	200-400	400-600	600-1000	1000-1500	1500-3000	> 3000	
Brandstofverbruik	mln kg	0.6	10.6	27.6	66.9	103.2	186.2	27.9	-
Energiegebruik	mln MJ	23	452	1177	2855	4405	7950	1148	-
Vervoersprestatie ^(b)	mln tonkm	18	739	2278	5560	7903	13567	1993	-
Energiegebruik	MJ/tonkm	1.30	0.61	0.52	0.51	0.56	0.59	0.58	0.56

bron: BARGE1.0 (NEI, NEA, RIVM 1996)

^(a) inclusief raffinage van brandstof worden de waarden een factor 1.067 hoger

^(b) vervoersprestatie van binnenlands vervoer en van internationaal vervoer op Nederlands territorium door Nederlandse en buitenlandse schepen

Het feit dat schepen met laadvermogenklassen groter dan 1000 ton een hoger energiegebruik per tonkilometer hebben is te wijten aan de lagere bezettingsgraad naar inhoud van schepen > 1000 ton (ca. 74%) in vergelijking tot schepen van 600-1000 ton (91%). Het hoge energiegebruik van schepen < 200 ton is waarschijnlijk een combinatie van een lage bezettingsgraad (74%) en een hoger energiegebruik per vaartuigkilometer. Het naar tonkilometerprestatie gewogen specifieke energiegebruik voor alle scheepscategorieën uit tabel 4.15 bedraagt 0.56 MJ/tonkm.

In de eerder genoemde studie van Rutten is het theoretisch energiegebruik (exclusief productie van brandstof) bij constante snelheid (13.9 km/h voor 1 en 2 duwbakken, 12.6 km/h voor 4 duwbakken) van de duwvaart afgeleid. Het energiegebruik bedraagt 0.28 MJ/tonkm voor 1 duwbak en 0.20 MJ/tonkm voor 4 duwbakken bij een belading van 17.5 ton per container. Dit energiegebruik blijkt volgens de berekeningen van Rutten niet of nauwelijks beïnvloed te worden door de belading per container. Alleen bij zeer lage beladingsgraad blijkt het energiegebruik wel toe te nemen (Rutten, 1995).

Het verschil van de waarden van Rutten met de waarde uit BARGE voor de laadvermogenklasse > 3000 is voor een deel te verklaren uit het feit dat Rutten geen rekening heeft gehouden met leegvaart en dat dit in BARGE wel het geval is. BARGE geeft voor de beladingsgraad naar afstand van schepen met een laadvermogen > 3000 ton de waarde 79% als het binnenlands vervoer betreft en 65% als het internationaal vervoer betreft (Bozuwa *et al.*, 1996). Daarnaast verklaren de door Rutten veronderstelde constante snelheden ook een deel.

De emissies door binnenschepen zijn berekend aan de hand van gegevens van CBS. In tabel 4.16 zijn de emissiefactoren in g/kg weergegeven evenals de emissiefactoren na omrekening in g/tonkm. Zoals eerder al bleek worden alleen de emissiefactoren van CO₂ en SO₂ significant verhoogd door het betrekken van het raffinageproces in de berekeningen.

Tabel 4.16. Emissiefactoren ^(a) van binnenvaartschepen in 1995

Energiegebruik (MJ/tonkm)	0.60		
	(g/kg brdst.)	(mg/tonkm) ^(b)	
Emissiefactoren:		excl. raffinage	incl. raffinage
CO ₂	3130	41.0 (g/tonkm)	44.2 (g/tonkm)
NO _x	60.0	787	790
CO	3.0	39	40
VOS	3.0	39	39
SO ₂	3.4	45	60
deeltjes	4.0	52	53

bron: TNO (Rijkeboer *et al.*, 1992), CBS (emmob, 1995), NEA (1995)

^(a) emissiefactoren voor vracht-, tank-, sleep- en duwschepen bij een motorbelasting van 85% van het maximaal vermogen.

^(b) voor de verbrandingswaarde van dieselolie is 42.7 MJ/kg aangenomen.

Toekomst

Uit het binnenvaartmodel BARGE1.0 blijkt dat energiegebruik per tonkilometer door de binnenvaart, zonder specifiek op de binnenvaart gericht beleid, in 2010 slechts 5% is afgenomen ten opzichte van 1993 (Bozuwa *et al.*, 1996). Deze prognose is opgebouwd uit een stijging van de motorefficiency (ca. 7%) samen met een lichte afname van de benuttingsgraad (= beladingsgraad naar inhoud maal de beladingsgraad naar

afstand).

Voor wat betreft de emissies in 2010 zal in het zogenoemde basisscenario zal volgens BARGE naast een 5% afname van de alle emissies als gevolg van de verbetering in energiegebruik geen verdere autonome verbetering plaatsvinden. Aanname hierachter zijn: 1) emissiewetgeving voor de binnenvaart heeft nog geen concrete vormen aangenomen en 2) wanneer wetgeving wel tussen 1995 en 2010 van kracht wordt zal de invloed op de vlootemissiefactor gezien de lange levensduur van binnenvaartmotoren gering zijn. Mogelijkheden tot reductie van de NO_x-emissiefactor met 80% in 2010 ten opzichte van 1995 worden mogelijk geacht door middel van invoering van een de-NO_x-katalysator (NEA, 1995).

4.6. Vergelijking tussen goederenvervoerswijzen in 1995

Voor de drie belangrijke goederenvervoersmodaliteiten vrachtauto's, goederentreinen en binnenschepen zijn in de voorgaande paragrafen het energiegebruik per tonkilometer berekend. Deze gemiddelde waarden voor het energiegebruik van de vervoerswijzen zijn nog eens samengevat in tabel 4.17.

Tabel 4.17. *Energiegebruik van goederenvervoer (incl. brandstof- en elektriciteitsproductie) in 1995*

	energiegebruik (MJ/tonkm)
Wegvervoer gemiddeld ^(a)	1.41
Vrachtauto < 10 ton	2.71
Vrachtauto > 20 ton	1.31
Trekkers	1.20
Goederentrein gemiddeld ^(b)	0.61
Binnenschip gemiddeld ^(c)	0.60
Binnenschip < 200 ton	1.39
Binnenschip < 600-1000 ton	0.54

^(a) voor binnenlands beroepsgoederenvervoer

^(b) elektrische en diesel-elektrische tractie

^(c) binnenlands en internationaal goederenvervoer

De emissies per tonkilometer zoals deze voor de beschouwde goederenvervoerswijzen in paragraaf 4.2 tot en met 4.5 zijn afgeleid zijn samengevat in tabel 4.18.

*Tabel 4.18. Energiegebruik en emissiefactoren van goederenvervoer in 1995
(incl. brandstof- en elektriciteitsproductie)*

	bestelauto	vrachtauto ^(a)	trekker	trein ^(b)	binnenschip
Energie (MJ/tonkm)	10.72	1.68	1.20	0.61	0.60
Emissies (g/tonkm)					
CO ₂	786	123	88	44	44
NO _x	3.78	1.40	1.21	0.28	0.79
CO	6.83	0.35	0.36	0.02	0.04
VOS	1.54	0.24	0.29	0.01	0.04
SO ₂	0.88	0.15	0.11	0.02	0.06
deeltjes	0.70	0.08	0.05	0.01	0.05

^(a) het betreft hier de gemiddelde vrachtwagen, dus ook kleine vrachtauto zijn hierin betrokken

^(b) het betref hier de mix van diesel-elektrisch en elektrisch railvervoer (zie paragraaf 4.4)

Zowel voor vrachtauto's als voor binnenschepen is in paragraaf 4.3 resp. 4.5 een onderscheid gemaakt tussen verschillende laadvermogenklassen. Deze opsplitsing is belangrijk als een vergelijking wordt gemaakt tussen vervoerswijzen voor langeafstandsvervoer. Op langeafstandsvervoer worden meestal grote vrachtauto's ingezet die zoals in tabel 4.17 is te zien een lager energiegebruik hebben dan de gemiddelde waarde voor het gehele Nederlandse vrachtauto- en trekkerpark. Ook zal de verdeling over de wegtypen verschuiven naar meer kilometers op autosnelwegen wat het specifiek energiegebruik ook verlaagt.

Een aspect dat bij bovenstaande vergelijking tussen goederenvervoersmodaliteiten van belang is betreft de aard van de vervoerde goederen (zie ook paragraaf 2.3). Het is bekend dat goederen vervoerd door wegvoertuigen minder massa per volume-eenheid hebben dan goederen vervoerd door goederentreinen of binnenschepen. Vaak gaat om hoogwaardiger produkten en zal het wegvoertuig eerder vol raken dan dat het maximaal te vervoeren gewicht wordt overschreden. Dit komt tot uitdrukking in de vervoersprestatie omdat de beladingsgraad naar inhoud lager zal worden en dit komt weer tot uitdrukking in een hoger energiegebruik (MJ/tonkm) en hogere emissies per tonkilometer (Komor, 1995). Bij het kwantificeren van de milieuwinst van een verschuiving van weg naar rail of binnenvaart moeten de vervoerswijzen binnen dezelfde vervoersmarkt worden vergeleken. In de studie van Rutten is de vergelijking voor het containervervoer bij constante snelheden uitgewerkt (Rutten, 1995). In tabel 4.19 zijn de resultaten van deze vergelijking weergegeven.

Tabel 4.19. Energiegebruik (MJ/tonkm) voor containervervoer over lange afstanden (snelheden zijn constant verondersteld)

	Trekker	Elektrische trein	Duwvaart	
			1 bak	4 bakken
snelheid (km/h):	80	80	13.9	12.6
hoge beladingsgraad ^(a)	0.65	0.20	0.30	0.20
lage beladingsgraad ^(b)	1.15	0.65	0.45	0.25

^(a) ca. 6 ton per container

^(b) ca. 22-24 ton per container

Vergelijking tussen de vervoerwijzen binnen het containervervoer leidt tot de conclusie dat wegtransport zowel bij hoge als bij lage beladingsgraad een 2-3 maal zo hoog energiegebruik per tonkilometer heeft als railvervoer en een 3-4 maal zo hoog energiegebruik als binnenvaart.

De emissies voor elektrisch railvervoer beduidend lager zijn dan bij de in tabel 4.18 veronderstelde mix van diesel-elektrisch en elektrisch railvervoer. In tabel 4.20 zijn voor de gemiddelde waarden voor het energiegebruik per vervoerwijze uit tabel 4.19 de emissies per tonkilometer weergegeven.

Tabel 4.20. Emissiefactoren voor containervervoer over lange afstanden (incl. brandstof- en elektriciteitsproductie) in 1995

	eenheid	Trekker ^(a)	Elektrische treinen ^(b)	Duwvaart ^(c)
Energie	MJ/tonkm	0.90	0.43	0.30
Emissie				
CO ₂	g/tonkm	66	31	22
NO _x	g/tonkm	0.964	0.035	0.395
CO	g/tonkm	0.225	0.004	0.020
VOS	g/tonkm	0.175	0.001	0.020
SO ₂	g/tonkm	0.064	0.014	0.030
deeltjes	g/tonkm	0.040	0.000	0.025

^(a) Emissiefactoren zijn afgeleid van de emissiefactoren van een trekker op de autosnelweg (CBS-emmob, 1995).

^(b) Emissiefactoren volgens SEP (SEP, 1995).

^(c) Emissiefactoren zijn afgeleid van CBS waarin de emissies in g/kg brandstof vermeld staan voor duw/sleepboten.

Uit tabel 4.20 blijkt dat de trekker-opleggercombinatie voornamelijk als gevolg van het hogere energiegebruik per tonkilometer hogere emissiefactoren heeft dan die van een binnenschip. Het feit dat motoren van wegvoertuigen gemiddeld schoner zijn dan die van binnenschepen verkleint het verschil tussen de trekker-oplegger en de duwvaart.

De goederentrein scoort over het algemeen beter dan het binnenschip. Met uitzondering van CO₂ en SO₂ zijn de emissies door de elektrische goederentrein zeer gering ten opzichte van de andere beschouwde vervoerwijzen.

Een ander aspect bij een vergelijking tussen vervoerwijzen is dat bij railvervoer en binnenvaart veelal aan- en afvoer met behulp van wegvoertuigen noodzakelijk is. Voor een reële vergelijking tussen goederenvervoerwijzen moet dit eigenlijk in de vergelijking betrokken worden. Dit is echter alleen mogelijk wanneer een specifiek vervoersprobleem wordt beschouwd, bijvoorbeeld het transport van fruit van de haven van Rotterdam naar een distributiecentrum in de provincie Groningen. Een dergelijke analyse zou een te willekeurig voorbeeld betekenen. Daar is hier van afgezien.

Veranderingen in parameters als gemiddelde snelheid van vervoerwijzen kunnen grote invloed hebben op de uitkomst van de vergelijking. Zoals bij goederenvervoer per spoor in paragraaf 4.4 al was te zien zal een verhoging van de snelheid van 80 km/h naar 130 km/h tot een verdubbeling van het energiegebruik per tonkilometer leiden. Gaat daarnaast voor wegverkeer een verlaging van de maximum snelheid van kracht worden, bijvoorbeeld van effectief 90 naar effectief 80 km/h, dan worden de verschillen tussen weg en rail veel kleiner.

4.7. Vergelijking tussen goederenvervoerwijzen in 2010

Op basis van prognoses die ten behoeve van de MV4-knelpuntenanalyse zijn gedaan wordt een indicatie gegeven voor het energiegebruik en de emissiefactoren van de verschillende goederenvervoerwijzen in 2010. In dit toekomstbeeld zijn alleen verbeteringen als gevolg van technische maatregelen verondersteld. Deze technische maatregelen worden uitgevoerd als gevolg van aanscherping van emissiewetgeving of als gevolg van autonome veranderingen. In de MV4-knelpuntenanalyse er alleen die wetgeving betrokken die volgens VROM medio 1996 naar grote waarschijnlijkheid in de periode 1995-2005 van kracht zullen worden (Geurs *et al.*, 1997, in voorbereiding).

Voor wat betreft technische maatregelen moet gedacht worden aan verbeteringen van het rendement van elektriciteitsproductie, brandstofproductie en van verbrandings- en elektromotoren en aan verlaging van emissiefactoren als gevolg van technische maatregelen aan raffinaderijen, elektriciteitscentrales en verbrandingsmotoren. De beladingsgraden naar inhoud en afstand zijn in 2010 gelijk verondersteld aan 1995. Gekozen is om de vergelijking in 2010 te betrekken op het containervervoer over lange afstanden (tabel 4.20) omdat deze vergelijking een betere indruk geeft van de verschillen dan een vergelijking op basis van geaggregeerde waarden voor het energiegebruik en de emissies van goederenvervoerwijzen (tabel 4.18). Tabel 4.21 geeft een overzicht.

Tabel 4.21. Emissiefactoren voor containervervoer over lange afstanden (incl. brandstof- en elektriciteitsproductie) in 2010

	eenheid	Trekker ^(a)	Elektrische treinen ^(b)	Duwvaart ^(c)
Energie	MJ/tonkm	0.85	0.37	0.28
Emissie				
CO ₂	g/tonkm	63	25	20
NO _x	g/tonkm	0.611	0.021	0.367
CO	g/tonkm	0.160	0.002	0.019
VOS	g/tonkm	0.104	0.000	0.019
SO ₂	g/tonkm	0.012	0.005	0.016
deeltjes	g/tonkm	0.019	0.000	0.023

^(a) Ten opzichte van 1995 zijn vrachtautomotoren schoner en zuiniger geworden als gevolg van introductie van EURO 2 en EURO 3 emissiewetgeving en is het zwavelgehalte van dieselolie voor het wegverkeer afgenomen (Geurs *et al.*, 1997, in voorbereiding)

^(b) Ten opzichte van 1995 is de elektriciteitsproductie efficiënter en schoner geworden (Dings, 1995e), de overschakeling naar 25 kV_{ac} is niet in de berekening betrokken

^(c) Ten opzichte van 1995 is de motorefficiëntie van scheepmotoren met 7% toegenomen en het zwavelgehalte van dieselolie voor het niet-wegverkeer afgenomen (Geurs *et al.*, 1997, in voorbereiding)

Uit een vergelijking tussen tabel 4.20 en 4.21 blijkt dat de trekker, of eigenlijk in het algemeen het goederenwegvervoer, in 2010 vooral voor nagenoeg alle beschouwde stoffen minder emitteert dan in 1995. De deeltjes- en SO₂-emissie van een trekker is in 2010 zelfs iets lager dan die van de duwvaart, de NO_x- en CO-emissie daarentegen veel hoger. Nogmaals tabel 4.21 is slechts een indicatie voor wat er door middel van uitvoering van de huidige (medio 1996) beleidsvoornemens (voor wat betreft emissienormering en brandstofkwaliteit) zal veranderen in de milieubelasting van de afzonderlijke goederenvervoerswijzen bij het uitblijven van logistieke optimalisatie.

5. CONCLUSIES

Uit hoofdstuk 2 blijkt dat er verschillende determinanten van invloed zijn op het energiegebruik en de emissies van vervoersmiddelen. Zo zijn er technische determinanten als rol- en luchtweerstand van het vervoermiddel en operationele determinanten als bezettingsgraad of beladingsgraad. Het energiegebruik per reizigerkilometer resp. tonkilometer van personen- resp. goederenvervoerwijzen wordt bepaald door het energiegebruik per door het vervoermiddel afgelegde kilometer (bepaald door technische determinanten) en de bezettingsgraad resp. de beladingsgraad. In een vergelijking tussen vervoerwijzen spelen ook andere operationele determinanten zoals de grofmazigheid van weg- en railinfrastructuur een rol. Deze zijn besproken in hoofdstuk 2 paragraaf 2.3.

In hoofdstuk 2 paragraaf 2.4 is het aspect 'reikwijdte van de gegevens' besproken. Met reikwijdte van gegevens wordt in dit kader de vraag bedoeld: waarop hebben de gegevens over het energiegebruik en de emissies van vervoerwijzen betrekking? Vooral van belang hierbij is of het gegevens over het energiegebruik en de emissies door het vervoermiddel betreft of dat er ook het energiegebruik en de emissies als gevolg productie en distributie van brandstof of elektriciteit in is meegenomen ('well to wheel'). Vooral bij elektrisch vervoer is dit verschil van zeer groot belang aangezien het energiegebruik van de elektriciteitscentrale in 1995 ca. 2.6 maal hoger is dan het energiegebruik van het elektrische vervoermiddel zelf.

Personenvervoer

Aan de hand van tabel 3.19 tot 3.21 waarin het directe energiegebruik resp. de directe emissies (inclusief die van raffinaderij of elektriciteitscentrale) per reizigerkilometer voor personenvervoerwijzen staan vermeld, kunnen conclusies worden getrokken over de meest efficiënte resp. minst milieuvriendelijke wijze van personenvervoer binnen steden en over langere afstanden. Hierbij wordt nadrukkelijk opgemerkt dat deze conclusies niets zeggen over vragen met betrekking tot de wenselijkheid van een verschuiving in de modal split naar meer openbaar vervoer. De navolgende conclusies zijn namelijk gebaseerd op verschillen in gemiddeld energiegebruik en gemiddelde emissies per reizigerkilometer voor de verschillende vervoerwijzen. Er wordt dus geen rekening gehouden met het feit dat, bij de huidige bezettingsgraden van het openbaar vervoer, een van auto naar trein of bus overstappende automobilist per definitie een milieuvoordeel sorteert. Daarnaast zal een grote verschuiving van auto naar openbaar vervoer tot een significante verhoging van de bezettingsgraden in het openbaar vervoer leiden, hetgeen de milieubelasting per reizigerkilometer van het openbaar vervoer

verlaagt. Zie voor meer informatie met betrekking tot marginale veranderingen paragraaf 2.3 en 3.6.

De conclusies op basis van verschillen in gemiddelde waarden zijn opgedeeld in individueel stadsvervoer, individueel lange-afstandsvervoer en georganiseerd groepsvervoer. Tenzij anders vermeld betreft het conclusies over energiegebruik en emissies per reizigerkilometer.

individueel stadsvervoer

Bij stadsvervoer wordt de personenauto voor stadsgebruik vergeleken met de stadsbus en met de tram en metro. De belangrijkste conclusies zijn:

- Zelfs bij redelijk optimistische schatting van het aantal inzittenden van de personenauto tijdens stadsritten (gelijk aan gemiddelde waarden over alle ritmotieven (= 1.65)) is het energiegebruik per reizigerkilometer ca. 1.3 maal zoveel als dat van stadsbus en ca. 2.5 maal zoveel als dat van tram en metro.
- De emissie per reizigerkilometer van NO_x door een stadsbus is ruim 3 maal zo groot als die van een personenauto. De emissiefactor voor deeltjes van een stadsbus is bijna 5 maal zo hoog als die van een personenauto. De CO -emissiefactor van een personenauto is daarentegen ruim 6 maal zo hoog als die van een stadsbus. De emissiefactoren voor VOS , CO_2 en SO_2 verschillen minder dan een factor 1.6. De emissiefactoren voor CO , VOS en deeltjes door trams en metro's zijn te verwaarlozen ten opzichte van die van de stadsbus en de personenauto. De emissiefactor voor NO_x door trams en metro's bedraagt 13% van die van een personenauto, de emissiefactor voor SO_2 25%.

Op basis van verschillen in gemiddelde waarden lijkt een verschuiving van auto naar stadsbus bij personenvervoer binnen de stadsgrenzen dus niet of nauwelijks bevorderlijk als het energiegebruik in beschouwing wordt genomen. Op basis van marginale veranderingen zal de genoemde verschuiving wel degelijk in een energiewinst resulteren omdat gezien de lage bezettingsgraad van de stadsbus de capaciteit nog lang niet volledig benut is. In eerste instantie zal zonder capaciteitsuitbreiding van het stadsbusvervoer de energiewinst van een verschuiving van auto naar bus gelijk zijn aan het energiegebruik van de auto. Bij grotere verschuivingen gaat dit niet meer volledig op doordat bijvoorbeeld de spitsdrukke met extra bussen moet worden opgevangen (zie ook paragraaf 3.6). Hetzelfde kan worden gesteld voor een verschuiving van auto naar trams en metro's.

individueel lange-afstandsvervoer¹⁸

Bij individueel lange-afstandsvervoer wordt de personenauto voor woon-werkverkeer vergeleken met de streekbus en met de trein. De belangrijkste conclusies zijn:

- Woon-werk verkeer met de auto blijkt o.a. door het lage aantal inzittenden (= 1.15) ca. 2 (stoptrein) tot 4 (intercity) maal zoveel energie te kosten als reizen per trein en ca. 2 maal zoveel meer als reizen per streekbus.
- Voor wat betreft de emissies per reizigerkilometer als gevolg van bijvoorbeeld woon-werkverkeer zal de streekbus meer NO_x en deeltjes emitteren dan de personenauto, gebruikt voor woon-werkverkeer. Dezelfde emissiefactor voor SO₂ is gelijk, de andere emissiefactoren zijn voor de streekbus lager.
- Individueel personenvervoer per trein leidt tot lagere emissies per reizigerkilometer dan per streekbus of per personenauto voor alle beschouwde emissiecomponenten.

Het hierboven voor een verschuiving van auto naar stadsbus, tram en metro gestelde t.a.v. marginale veranderingen is ook voor een verschuiving van auto naar streekbus en trein van toepassing.

georganiseerd groepsvervoer

Bij georganiseerd groepsvervoer wordt de personenauto voor sociaal-recreatief verkeer vergeleken met de touringcar en met de trein. De belangrijkste conclusies zijn:

- Bij georganiseerde groepsreizen zal het reizen per intercity ca. 2 maal zoveel energie kosten als reizen per touringcar. Het reizen per personenauto (1.84 inzittenden bij sociaal-recreatief gebruik) kost ca. 4.5 maal zoveel energie als reizen per touringcar. Zelfs het reizen per maximaal bezette personenauto (5 inzittenden) blijkt nog 1.65 maal zoveel energie te kosten als reizen per gemiddeld bezette touringcar.
- Voor wat betreft de emissies per reizigerkilometer als gevolg van georganiseerd personenvervoer kan gesteld worden dat met uitzondering van CO₂ het vervoer per trein minder emissie per reizigerkilometer oplevert dan vervoer per touringcar. Voor SO₂ heeft is deze emissiefactor van de touringcar lager dan die van de stoptrein maar hoger dan die van de intercity. De emissies per reizigerkilometer van sociaal-recreatief vervoer per personenauto zijn alle hoger dan van groepsvervoer per touringcar. Alleen de emissiefactor voor deeltjes van beide vervoerwijzen is gelijk.

Het hierboven voor een verschuiving van auto naar stadsbus, tram en metro gestelde t.a.v. marginale veranderingen is ook voor een verschuiving van auto naar touringcar en intercity van toepassing.

¹⁸ Met individueel lange-afstandsvervoer wordt interstedelijk vervoer bedoeld, bijvoorbeeld woon-werkverkeer.

toekomstige situatie 2010

Uit tabel 3.21 blijkt dat, zonder verbeteringen van de bezettingsgraden, het milieuvoordeel van de bus in 2010 ten opzichte van de auto zal verkleinen vergeleken met 1995. Bij een vergelijking tussen de emissies tussen een stadsrit per auto en per stadsbus blijkt dat in 2010 de emissie van CO₂, CO en SO₂ van de auto nog hoger zullen zijn dan die van de stadsbus. De andere beschouwde emissiefactoren zullen lager zijn. Vergelijking tussen het railvervoer en de personenauto leiden in alle gevallen nog steeds tot de conclusie dat de personenauto in bijna alle situaties hogere emissies per reizigerkilometer zal hebben. Dit met uitzondering van de NO_x-emissiefactor die bij stoptreinen ongeveer dezelfde waarde zal hebben als bij personenauto's.

Aangezien de bezettingsgraden van het openbaar vervoer constant zijn verondersteld zal een van auto naar openbaar vervoer overstappende automobilist ook in 2010 per definitie een milieuvoordeel sorteren. Daarnaast zal een grote verschuiving van auto naar openbaar vervoer tot een significante verhoging van de bezettingsgraden in het openbaar vervoer leiden, hetgeen de milieubelasting per reizigerkilometer van het openbaar vervoer verlaagt.

Bovenstaande conclusies gelden bij de aanname dat de huidige beleidsvoornemens voor wat betreft emissienormering van nieuwe voertuigen en de brandstofkwaliteit (zwavelgehalte) worden uitgevoerd. Het effect van maatregelen ter stimulering van bijvoorbeeld het gebruik van LPG of CNG in stads- en streekbussen is niet meegenomen. Dit geldt ook voor het effect van maatregelen gericht op het verhogen van bezettingsgraden in het openbaar vervoer, het laatste wegens het ontbreken van kwantitatieve gegevens.

Goederenvervoer

Uit hoofdstuk 4 wordt duidelijk dat bij goederenvervoer berekeningen op basis van gemiddelde waarden vooral bij vrachtauto's geen goede basis is voor een vergelijking tussen goederenvervoerswijzen. Bij wegvervoer en binnenvaart is dan ook een opsplitsing gemaakt naar laadvermogenklassen om op die manier een vergelijking mogelijk te maken tussen railvervoer, waarbij vooral over grotere afstanden wordt vervoerd, binnenvaart en wegvervoer met zware vrachtauto's en trekkers. De conclusies die in hoofdstuk 4 zijn getrokken worden hierna opgesomd. Tenzij anders vermeld betreft het conclusies over energiegebruik en emissies per tonkilometer.

huidige situatie

- De invloed van de beladingsgraad van vervoerwijzen op het energiegebruik per afgelegde kilometer blijkt voor vrachtauto's aanzienlijk te zijn. Een hoger totaalgewicht geeft meer verliezen door rolweerstand en acceleratie. Verdubbeling van de belading leidt tot een stijging van het energiegebruik van gemiddeld 15%. Voor binnenvaart en railgoederenvervoer is de invloed van de hoeveelheid belading op het energiegebruik per vaartuig- resp. treinkilometer gering. Dit als gevolg van constantere snelheden en bij goederentreinen bovendien van de lage rolweerstandscoefficiënt.
- Het energiegebruik per tonkilometer binnen de verschillende goederenvervoerwijzen is sterk afhankelijk van het laadvermogen. Zo is het energiegebruik van kleine vrachtauto's (3.5-10 ton GVW) voor het beroepsgoederenvervoer ca. 2 maal zoveel als dat van grote vrachtauto's (> 20 ton GVW). Het energiegebruik per voertuigkilometer van deze kleine vrachtauto's is daarentegen bijna 3 maal lager dan dat van grote vrachtauto's. Bij de binnenvaart is de spreiding nagenoeg even groot; het energiegebruik van kleine binnenvaartschepen tot 200 ton, 1.30 MJ/tonkm, is ca. 2.5 maal zo hoog als dat van schepen met een laadvermogen van 600-1000 ton. De laatste categorie heeft met 0.51 MJ/tonkm van alle binnenvaartschepen het laagste energiegebruik.
- Wordt op basis van gemiddelde waarden het energiegebruik van verschillende goederenvervoerwijzen vergeleken dan blijkt het energiegebruik van het binnenlands goederenwegvervoer per vrachtauto of trekker (1.41 MJ/tonkm), ca. 2.3 maal zo hoog te zijn als dat van het goederenrailvervoer (0.61 MJ/tonkm) en dat van de binnenvaart (0.60 MJ/tonkm). Het energiegebruik per tonkilometer van de gemiddelde bestelauto in 1995 is 7 tot 9 maal zo hoog als dat van de gemiddelde vrachtauto en trekker voor binnenlands beroepsgoederenvervoer.
- Voor wat betreft de emissies per tonkilometer kan op basis van gemiddelde waarden gesteld worden dat de goederentrein met uitzondering van CO₂ veruit de laagste emissies per tonkilometer heeft (zie tabel 4.18). De emissiefactoren van de bestelauto zijn voor wat betreft alle componenten veel hoger dan die van de andere vervoerwijzen. De NO_x-emissiefactor in gram per tonkilometer van bestelauto's in 1995 is 2 maal zo hoog als die van vrachtauto's terwijl de CO₂-emissiefactor 5.6 maal zo hoog is. Het beperkte verschil in de NO_x-emissiefactor is het gevolg van het feit dat bestelauto's (waarvan 80% met dieselmotor) in 1995 nog voornamelijk met IDI-dieselmotoren waren uitgerust die typisch een lagere NO_x-emissie hebben dan de DI-motoren die in vrachtauto's worden gebruikt. Daarnaast zal de gemiddelde motorbelasting van motoren in bestelauto's, en daarmee de temperatuur in de verbrandingskamer en daarmee de NO_x-vorming, lager zijn dan die van motoren in vrachtauto's. De reden hiervan is dat het motorvermogen per laadvermogen (kW per GVW) van bestelauto's hoger is dan dat van vrachtauto's.

- Bij het goederenvervoer is naast de determinant beladingsgraad de aard van de vervoerde goederen van groot belang. Vracht- en bestelauto's vervoeren, meer dan bij goederentreinen en binnenschepen het geval is, lading met een lage dichtheid (veel volume ten opzichte van het gewicht) waardoor het maximale laadvermogen niet wordt benut. Het gevolg hiervan is dat die vracht- en bestelauto's - ceteris paribus - een hoger energiegebruik per tonkilometer hebben dan wanneer vracht- en bestelauto's dezelfde goederen zouden vervoeren als binnenschepen of treinen. Het verdient derhalve aanbeveling alleen vervoerwijzen binnen specifieke vervoersmarkten te vergelijken.
- Wordt niet met gemiddelde waarden voor vervoerwijzen gerekend maar met waarden voor vervoerwijzecategorieën binnen specifieke vervoersmarkten, zoals bijvoorbeeld containervervoer over lange afstanden, dan blijkt uit tabel 4.19 dat het energiegebruik per tonkilometer van trekker-opleggers ca. 2-3 maal zo hoog is als dat van goederentreinen en binnenschepen. Dit resultaat is nagenoeg identiek aan het resultaat bij gebruik van gemiddelde waarden (zie één van voorgaande conclusies).
- Ook op basis van de vergelijking tussen vervoerwijzecategorieën, ingezet voor een specifieke vervoersmarkt, blijkt uit een vergelijking tussen de emissies per tonkilometer door goederenvervoerwijzen (tabel 4.20) dat de elektrische goederentrein het best uit de vergelijking komt. De emissie van deeltjes door elektrische goederentreinen is vergeleken met de duwvaart en het wegtransport verwaarloosbaar. De duwvaart heeft weliswaar een lagere CO₂-emissiefactor, de NO_x-emissiefactor is daarentegen ruim 11 maal hoger dan die van het elektrisch goederenrailvervoer.
- Bij een vergelijking tussen goederenvervoerwijzen dient ermee rekening te worden gehouden dat in geval van vervoer per trein of binnenschip veelal voor- en natransport door vracht- of bestelauto's noodzakelijk zal zijn.

toekomstige situatie 2010

- Bij het wegvervoer is er in de toekomst als gevolg van verdere aanscherping van met name de NO_x-emissiewetgeving geen grote afname van het brandstofverbruik te verwachten. De verbetering van het energiegebruik per tonkilometer in het railvervoer in 2010 zal voor elektrische tractie ca. 25% bedragen (bij de aanname dat wordt overgeschakeld op 25 kV_{ac}) en voor diesel-elektrische tractie ca. 10% ten opzichte van 1995. Prognoses voor 2010 voor de binnenvaart duiden op een lichte daling (ca. 5%) van het energiegebruik per tonkilometer ten opzichte van 1993. Bij gelijkblijvende laadvermogens en benuttingsgraden zal het verschil tussen wegtransport en de andere twee vervoerwijzen voor wat betreft het energiegebruik groter worden. Een eventuele toekomstige verhoging van de maximale GVW voor wegvoertuigen van 50 ton naar bijvoorbeeld 60 ton zal de groei van het verschil enigszins kunnen doen verkleinen.

- In de toekomst zullen vrachtwagens en trekkers als gevolg van aanscherping van de emissie-eisen schoner worden. Aangezien dergelijke emissiewetgeving (nog) niet voor de binnenvaart en railvervoer bestaat, zal het milieuvoordeel (= lagere emissiefactoren) van het railvervoer en de binnenvaart in de toekomst minder worden. Zonder beleid zullen de emissies per tonkilometer van de binnenvaart in 2010 niet meer dan 7% dalen (als gevolg van efficiencyverbetering). Bij verplichte toepassing van een de-NO_x-katalysator zal de NO_x-emissiefactor van binnenschepen met ca. 80% kunnen afnemen. Bij elektrisch railvervoer zal als gevolg van én de afname van de emissies (per kWh) door elektriciteitscentrales en als gevolg van de efficiencyverbetering de SO₂-emissiefactor in 2010 meer dan halveren ten opzichte van 1995, en de NO_x-emissiefactor met ca. 40% afnemen. De andere emissiefactoren zullen nagenoeg niet gereduceerd worden. Bij diesel-elektrische goederentreinen wordt in 2010 naast de afname als gevolg van de genoemde 10% efficiencyverbetering alleen een verdere afname van de emissiefactoren verwacht als dit door beleid wordt afgedwongen.
- Uit een vergelijking van het energiegebruik en de emissiefactoren van goederenvervoerswijzen ten behoeve van containervervoer tussen 1995 en 2010 (tabel 4.20 en 4.21) blijkt dat bij het goederenwegvervoer een redelijk grote reductie wordt bereikt van de emissiefactoren in tegenstelling tot elektrisch railvervoer en de duwvaart. Containervervoer per elektrische trein behoudt zijn ruime voorsprong op het goederenwegvervoer en de duwvaart. In de gegevens voor 2010 zijn alleen verbeteringen beschouwd in efficiency van verbrandingsmotoren en elektriciteits- en brandstofproductie en reducties van emissiefactoren als gevolg van emissienormering. Veranderingen in beladingsgraden zijn niet beschouwd.

LITERATUUR

Alink, G.M.M. (1992)

Snelheidsbegrenzer voor de vrachtauto

Verkeerskunde nr.3, pp. 22-29

Alois Frisse, H-P. (1993)

Sauerstoffanreicherung in Kombination mit Abgasrückführung als Konzept zur Verminderung der Schadstoffemission des Dieselmotors

Dissertatie Technischen Hochschule Aachen

Anderson, J.E. (1988)

What determines transit energy use?

Journal of Advance Transportation, Vol 22, No. 2, pp. 108-133

Arends, B., P. Kroon, S. Slanina, R. Ybema (1995)

Weegfactoren voor luchtverontreiniging veroorzaakt door het vervoer

Lucht, nr. 2, juni 1995, pp. 42-45

Bakema, G.F., O. van Hilten, A.D. Kant, P. Kroon (1990)

Aargas en elektriciteit bij het gemeentelijk voertuigpark van Amsterdam

ECN-C--90-045, ECN, Petten

Becker, K., H.L. Baarbé, R.C. Rijkeboer, A. Richter (1993)

Emission behaviour of Low-Pollution Petrol-Engine Motor-Vehicles in Use

SAE-paper 930776, Warrendale

BGC (1994)

Energiegebruik en milieubelasting in verkeer en vervoer 1980-1993

NOV/241/30/Bq, Deventer

BGC (1995)

Effecten van aankoop- en rijgedrag, Bedrijfsvoertuigen

Informatie t.b.v. de campagne "Koop zuinig, Rij zuinig" (NOVEM)

NOV/272/36/Sp, Deventer

Bijsterbosch, B. (1996)

Eindrapport Steekproefcontroleprogramma vrachtwagens 1994/1995

TNO-WT, Rapportnr. 96.OR.VM.033.1/BJB, Delft, juli 1996

- Binsbergen, A.J. van, A. Erkens, B. Hamel (1994)
Long-term Energy Efficiency Improvement for Transport, Technology Assessments
TU Delft, VK 1901.303, Faculteit Civiele Techniek, Delft
- Bosch (1990)
Technische leergang "Uitlaatgastechiek voor benzinemotoren"
Delta Press BV, Overberg
- Bossche, van den M.A., M.J.P.F. Gommers, R.J. Molemaker,
M.Y. van Schijndel-Pronk, M. van Schaik (1996)
*De Milieufunctie van het Openbaar Vervoer in Stedelijke Gebieden: Op Weg naar een
Groene Toekomst*
Rotterdam: NEI, mei 1996
- Bozuwa, J., L.M. Bus, P.M. Donselaar (1996)
BARGE-model 1.0, Verkeers- en vervoersprestaties
Rotterdam: NEI
- Bus, L., J. Bozuwa, C. Hörchner (1996)
ATTACK 2.0; Documentatie
Rotterdam: NEI
- CBS(a)
Statistiek van de motorvoertuigen
Voorburg, meerdere jaargangen
- CBS(b)
Statistiek van de binnenvloot
Voorburg, meerdere jaargangen
- CBS(c)
Statistiek van het binnenlands goederenvervoer
Voorburg, meerdere jaargangen
- CBS(d)
Maandstatistieken Verkeer en Vervoer
Voorburg, meerdere maanden
- CBS (1995)
Emmissies Mobiele Bronnen (emmob-files)
(diskettes)
Voorburg

Charbonnier, M.-A., M. Andres (1993)

A comparative Study of Gasoline and Diesel Passenger Car Emissions Under Similar Conditions of Use

SAE-paper 930779, Warrendale

Dings, J. M.W., R. Wit (1995a)

Discussienota voor de workshop Personenvervoer

In het kader van het projekt DEOS 2030

CE, Delft

Dings, J. M.W. (1995b)

Achtergronddocument verbeteropties in het goederenvervoer

In het kader van het projekt DEOS 2030

CE, Delft

Dings, J.M.W., P. Janse (1995c)

Inventarisatie en analyse van milieunormen voor wegvoertuigen en hun brandstoffen

CE, Delft

Dings, J.M.W, P. Mensinga (1995d)

Op weg naar een schoner transport

Integratieproject Milieu en Economie in de Transportsector

Bijlage 2, Voorstudie Techniek en Rijgedrag

CE, Delft

Dings, J.M.W., P. Janse (1995e)

Vergelijking milieu-effecten E- en DE-tractie van goederentreinen

CE, Delft

Dings, J.M.W. (1996)

Kosten en Milieu-effecten van technische maatregelen in het verkeer

CE, Delft

Domburg, R. van (1996)

Auto met opbergzak voor luchtvervuiling

Intermediair, 32e jaargang nummer 13, blz. 35, 29 maart 1996

- Dresden-Rausch, J., R. Kolke, F-J. Weber (1995)
Feldüberwachung als Instrument zur Minderung des Emmisionsniveaus von Fahrzeugen im Verkehr
VDI-Berichte nr 1228, pp. 339-352
- Energiebedrijf Amsterdam (1994)
maandblad "De Koppeling", juni 1994
Amsterdam
- European Commission (1992)
Default emission factor handbook
Corinair Technical Annexes, Volume 2
Directorate-General Environment, Brussels
- European Commision (1993)
The European High Speed Train Network
Commision of the European Communities - Directorate General Transport
Uitgevoerd door Mens en Ruimte Research & Consulting n.p.o. (M + R), Brussels
- European Commission (1996)
Estimation of pollutant emissions from transport
Proceedings of the workshop, 27-28 November 1995, ULB
Directorate General for Transport, Brussels
- Fergusson, M. (1994)
The effect of vehicle speeds on emissions
Energy Policy, February 1994, pp. 103-106
- Geurs, K.G., R.M.M. van den Brink, G.P. van Wee, J.A. Annema (1997)
Verkeer en Vervoer in de Nationale Milieuverkenning 4
RIVM, Bilthoven, in voorbereiding
- Hamerslag, R., M. Westerman (1993)
'Push-maatregelen' werken soms averechts
Verkeerskunde, nr. 3, pp. 16-22
- Havenith, C (1991)
Emissionsverhalten von Nutzfahrzeugmotoren bei Verwendung von Pflanzenölen
VDI Berichte nr. 885, pp. 129-166

Heaton, D.M., R.C. Rijkeboer, P. van Sloten (1992)
Analysis of emission results from 100 in-use passenger cars tested over regulation cycles and non-regulation cycles
Symposium "Traffic induced air pollution", Graz University of Technology, 10-11 September 1992

Helden, M. van, R.C. Rijkeboer (1995)
Besparingspotentiël van vrachtauto's
TNO nr. 95.OR.VM.001.1/MvH/RR, Delft

Immers, L., Th. Muller, P. Tanja, M. Vanderschuren (1994)
Verkenning energiebesparingsopties personenvervoer
TNO-Beleidsstudies, 94/NV/072, Delft

Johansson, B. (1995)
Strategies for reducing emissions of air pollutants from the Swedish transportation sector
Transportation Research - A, Vol 29A, nr. 5, pp. 371-385

Kattner, A. (1992)
Die Entwicklung von Nutzfahrzeugmotoren- Einflüsse und technische Möglichkeiten
Proceedings van studiedag 'nieuwe brandstoffen voor een milieuvriendelijk transport', Antwerpen

Komor, P. (1995)
Reducing energy use in US freight transport
Transport Policy, vol2, nr. 2, pp. 119-128

Kuipers, H. (1990)
Transport Jaarboek 1990
Elmar, Rijswijk

Laar, P.A. van (1993)
Het specifiek energiegebruik van transportmodaliteiten
scriptie TUD, Delft

Lenaers, G. (1992)
Katalysatoren en deeltjesfilters
Proceedings van studiedag 'nieuwe brandstoffen voor een milieuvriendelijk transport', Antwerpen

- Lenaers, G., I. de Vlieger (VITO, Belgium) (1995)
Moderate driving behaviour cuts fuel consumption
CADDET Energy Efficiency Newsletter, nr. 4, pp.11-12
- Leniger, H (1995)
Onderzoek naar verbeterde dieselmotoren
Technieuws, jaargang 33 nr.1, pp. 35-37
- Lepperhof, S., Huthewohl, S., Pischinger, F (1992)
Catalytic reduction of NO_x in diesel exhaust
SAE-paper 925022, Warrendale
- Mede, P.H.J. van der (1990)
Het effect van snelheidsbegrenzers
Verkeerskunde 41, nr. 10, pp. 466-469
- Moll, H., K.J. Kramer (1996)
Tweede concept eind-rapportage project Levensduur Personenauto
Interfacultaire Vakgroep Energie en Milieukunde (IVEM)
RUG, Groningen
- NEA (1995)
Verbruiks- en emissiecijfers voor de binnenvaart
Rijswijk
- NEA (1995a)
Personenvervoer en Milieu
Rijswijk
- Nederlandse Spoorwegen (1993)
Basisonderzoek
Utrecht
- Nederlandse Spoorwegen (1994)
Algemene bedrijfsgegevens 1993
Utrecht, mei 1994
- Nederlandse Spoorwegen (1996a)
Telefonische mededeling W. Fichter (NS-Materieel) over percentage goederenvervoer
in het totale diesellieverbruik en in het elektriciteitsgebruik in 1990, februari 1996

Nederlandse Spoorwegen (1996b)

Gegevens over bezettingsgraden van stoptreinen en intercity's in dal- en spits afkomstig van H. van Oostroom (NS-Reizigers), april 1996

Nederlandse Spoorwegen (1996c)

Mondelinge mededeling over percentage treinkilometers door D- en DE-stoptreinen en intercity's afkomstig van C. Kouwenhoven (NS-Materieel), juni 1996

Paauw, K.F.B. de (1995)

Energieaspecten van vrije-tijdsbesteding, verzorging, communicatie en roken
ECN, nr. ECN-C--95-026, Petten

Pavlidis, V., R. Joumard (INRETS) (1996)

Cold start emission factors for passenger cars
Proceedings of the workshop COST 319, 27-28 november 1995, Brussel

Pulles, T., L. de Leu (1994)

Rijgedrag en luchtverontreiniging
Lucht, nr. 4, december 1994

Quality of Urban Air Review Group (1993)

Diesel Vehicle Emissions and Urban Air Quality
Second Report of the Quality of Urban Air Review Group, London

Rienstra, S.A., R.T.M. Smokers, P. Nijkamp (1995)

Energy Scenarios for European Passenger Transport in the Year 2030
Tinbergen Instituut, Vrije Universiteit Amsterdam
ISSN 0929-0834, Amsterdam

Rijkeboer, R.C., P. van Sloten, M. Elderman, B. van den Haspel, P. Kroon (1992)

Wijziging brandstofmix: een studie naar de gevolgen voor het energieverbruik en emissie van een drastische wijziging van de verdeling benzine-diesel-LPG bij personen- en bestelwagens
TNO-WT/ECN/CE, Delft

Rijkeboer, R.C., M.F. van der Haagen (1993)

Steekproefcontroleprogramma, onderzoek naar luchtverontreiniging door personenauto's in het verkeer
Publicatiereeks Geluid en Verkeer, jaarrapport 1991/1992,
VROM, Directoraat-Generaal Milieubeheer, Den Haag

Rutten, B.J.C.M. (1990)

Energiezuinig rijden gaat de verkeerde kant op
Polytechnisch Tijdschrift Energie, nr. 5, pp. 30-33

Rutten, B.J.C.M. (1995)

Does international transport decrease energy consumption and CO₂ emissions in freight transport?
WCTR, Sydney, 16-21 juli 1995

Sauer, H. (1991)

Sag die Wahrheit; Umwelt; Die Öko-Lügen
Test & Technik, 22/1991

Scholl, L., L. Schipper, N. Kiang (1996)

CO₂ emissions from passenger transport
Energy Policy, Vol. 24, No. 1, pp. 17-30

SEP / EnergieNed (1995)

Elektriciteit in Nederland 1994
Arnhem

Spakman, J. (1996)

Mondelinge mededeling
RIVM, Bilthoven

Statoil (1995)

Global Transport Sector Energy Demand towards 2020
WEC Tokyo Congress, 8-13 October, 1995
World Energy Council, Project 3, Working Group D
Statoil Energy Studies Program, Tokyo

The Skandia Environmental Commission (1992)

Cold starts and emissions from cars equipped with catalytic converters
report nr. 3, Stockholm

Tensen, D.K. (1996)

Personenvervoer en milieu, een reële vergelijking
Verkeerskunde, nr.2 (1996), pp. 16-20

Uittenbogaart, P.J. (1993)

ATTACK, Een Interactief Computer-Simulatiemodel voor het bedrijfsvoertuigenpark
NEI, T1668 UIT/YD, Rotterdam

Venne, J. van de, R.C. Rijkeboer (1996)

Rekenmodel voor emissie en brandstofverbruik van bedrijfswagens en het schatten van ontwikkelingstendensen voor de modelparameters
TNO-WT, 95.OR.VM.072.1/JvdV, Delft

Vermeer, B. (1994)

Naar 25 kV

Intermediair, 9 november 1994, pp. 13

Wee, G.P. van, J. van der Waard, M.J. van Doesburg, H.C. Eerens, H. Flikkema, A.L. 't Hoen, E. Rab, R. Thomas (1993)

Verkeer en Vervoer in de Nationale Milieuverkenning 3 en de SVV-Verkenning 1993
RIVM, Bilthoven

Wee, G.P. van, R. Thomas, W. Dunnewold, M. van den Heuvel (1994)

Effecten van de Betuweroute op NO_x- en CO₂-emissies
RIVM/INRO-TNO, maart 1994

Wee, G.P. van, J. van der Waard (1996)

De verkeersscenario's in de vervolgnota klimaatverandering
RIVM, nr. 408130002, Bilthoven, juni 1996

Wens, B. (Bond Beter Leefmilieu) (1992)

Naar een meer efficiënte mobiliteit

Proceedings van studiedag 'nieuwe brandstoffen voor een milieuvriendelijk transport'
Antwerpen, 2 april 1992

Wit, R., J.M.W. Dings, G. Bergsma, S. de Bruyn, S. Vroonhof (1995)

DEOS 2030; verslagen miniworkshops en achtergronddocumenten: 1 Personenverkeer; 2 Goederenvervoer; 3 CO₂-problematiek; 4 Afvalstromen
CE, Delft

Walwijk, M. van, C.T.A. Leijds (1994)

Brandstoffen voor het wegverkeer
INNAS B.V., Breda